

Implementação de amperímetro por sensor magnético de efeito Hall aplicado a instrumentação de carregadores de baterias tipo íon-lítio

Thieplo de Benites Bertola Gonçalves

Implementação de amperímetro por sensor magnético de efeito Hall aplicado a instrumentação de carregadores de baterias tipo íon-lítio

Aluno: Thieplo de Benites Bertola Gonçalves

Orientador: Alan C. Kubrusly

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver nove amperímetros, a partir da combinação de três placas projetadas no programa Eagle 7.7 da fabricante Cadsoft®, fresadas em prototipadora, com até dois tipos de blindagens da fabricante Maglab®. Cada uma dessas placas tem uma, duas ou três voltas de trilha de corrente, juntamente com podendo ter instaladas nelas as blindagens tipo U12 e R1, do fabricante Maglab®. Em cada uma dessas nove combinações, com auxílio de instrumentos de laboratório de precisão, como fonte, osciloscópio e multímetro, foram levantadas medidas de corrente elétrica de -3A até 3A, passando-se pelo 0A(sem corrente) e variando-se a corrente a cada 1 A.

A partir do levantamento desses dados, calculou-se a média, desvio padrão e coeficiente de variação das medidas para determinar a precisão e exatidão dos nove multímetro projetados e escolher aquele mais adequado para monitorar um carregador de baterias de íon-lítio, que realiza a carga de um pack de baterias de Litio-íon de 12600 mAh da fabricante Powerizer®, com corrente de carga de até 6 A em corrente contínua.

Palavras-chave: Amperímetro, Instrumentação, Magnetismo, sensor IMC-Hall, Sensor de efeito Hall



Implementation of ammeter by Hall effect magnetic sensor applied to instrumentation of lithium-ion battery chargers

Abstract

This work aims to develop nine ammeters, from the combination of three boards designed in the program Eagle 7.7 Cadsoft®, prototyped with up to two types of shields manufacturer Maglab®. Each of these plates has one, two or three turns of current chain track, together with the type U12 and R1 shields manufactured by Maglab®. In each of these nine combinations, with the aid of precision laboratory instruments, such as a source, oscilloscope and multimeter, electrical current measurements of -3A up to 3A were taken, passing through 0A (no current) and varying the current every 1 A.

From the data collection, the mean, standard deviation and coefficient of variation of the measurements were calculated to determine the precision and accuracy of the nine designed multimeter and to choose the most suitable to monitor a lithium-ion battery charger, which performs the charge of a Powerizer® manufacturer's 12600 mAh lithium-ion battery pack, with load current up to 6 A in direct current.

Keywords: Ammeter, Instrumentation, Magnetism, IMC-Hall sensor, Hall effect sensor

1. Introdução e contextualização
 - 1.1 Introdução
 - 1.2 Objetivo
 - 1.3 Estrutura de trabalho
2. Escolha do sensor IMC-Hall® MLX91205KDC-AAL
 - 2.1 Sensores Hall convencionais
 - 2.2 Sensores IMC-Hall®
3. Projeto do amperímetro
 - 3.1 Estreitamento da largura da trilha
 - 3.2 Placas com diferentes enrolamentos de trilha de corrente
 - 3.3 Blindagens
4. Avaliação experimental
 - 4.1 Amperímetros com placa 1 e blindagens variadas
 - 4.2 Amperímetros com placa 2 e blindagens variadas
 - 4.3 Amperímetros com placa 3 e blindagens variadas
 - 4.4 Amperímetros sem blindagem e placas variadas
 - 4.5 Amperímetros com blindagem U12 e placas variadas
 - 4.6 Amperímetros com blindagem R1 e placas variadas
5. Conclusão

1. Introdução e Contextualização

1.1 Introdução

Tradicionalmente existem duas maneiras de se medir corrente elétrica: uma é baseada em eletromagnetismo e está associada ao medidor de bobina móvel, chamado medidor de Arsonval [1] e a outra é baseada na Lei de Ohm [1][2].

O medidor de Arsonval é um transdutor eletromecânico analógico que produz uma deflexão rotativa de um eixo, em resposta à corrente elétrica que flui através de sua bobina, e o eixo por sua vez move um ponteiro numa escala em forma de arco. Esse medidor funciona como um amperímetro, e sua construção pode ser feita com eixo móvel de ferro, ou com eixo móvel de bobina, este último mais comum. Quando uma corrente contínua (CC) flui através da bobina, a mesma gera um campo magnético, e esse campo atua contra o ímã permanente. A bobina gira, empurrando uma mola e movendo o ponteiro numa escala que deve ser calibrada a fim de indicar o nível correto da corrente elétrica. Um projeto bem construído garante que o campo magnético seja uniforme, de modo que a deflexão angular do ponteiro seja proporcional à corrente [1]. Abaixo, na figura 1, dois exemplos de medidor de Arsonval.

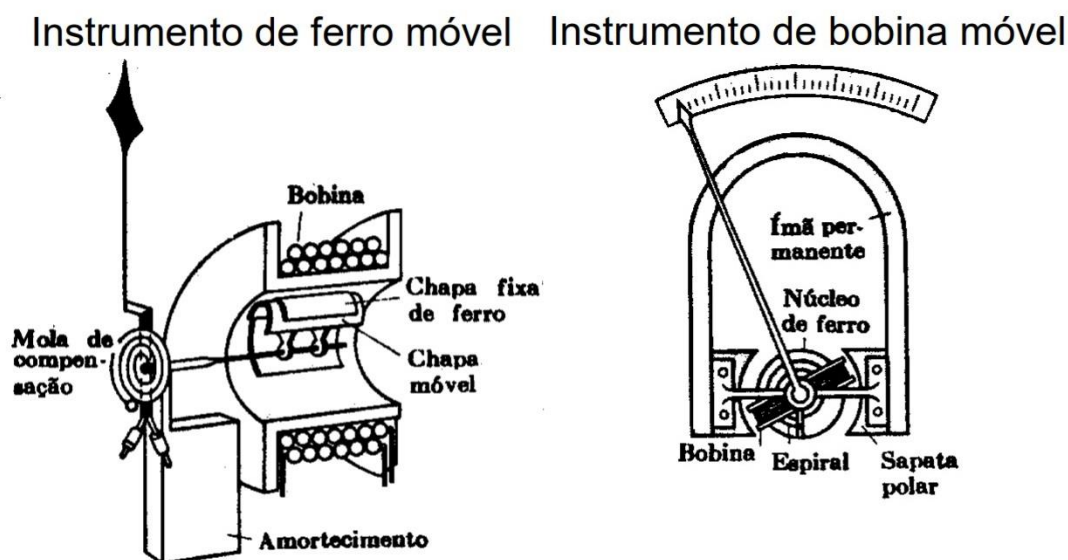


Figura 1 - Extraída de [3]. Medidor amperímetro de Arsonval. Na figura da esquerda o medidor de eixo ferro móvel, e na figura da direita o medidor de eixo bobina móvel [3].

Todavia, a maioria dos amperímetros de hoje é baseada na Lei de Ohm [1]. A Lei de Ohm afirma que, a corrente elétrica que passa por um condutor entre dois pontos é diretamente proporcional à diferença de potencial elétrico entre esses pontos e inversamente proporcional à resistência entre eles. Essa relação é expressa por

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (1)$$

onde I é a corrente elétrica a ser medida, em corrente contínua (CC), ΔV é a diferença de potencial ou queda de tensão entre dois pontos, e R é a resistência ou impedância do circuito. No SI as unidades de cada uma dessas são: Amperes (A), Volts (V), e Ohms (Ω), respectivamente.[2].

Amperímetros modernos são essencialmente voltímetros com um resistor de precisão, conhecido como resistor "shunt", com baixa resistência, usualmente de 0.01Ω a $0,1 \Omega$. Logo, usando a Lei de Ohm pode-se medir a corrente com precisão. Há dois possíveis pontos para inserção deste resistor num circuito, classificados como shunt no lado-baixo e shunt no lado-alto, respectivamente construídos como ilustrado na figura 2[2].

A figura 2 mostra as duas topologias de amperímetro com resistor shunt. Na esquerda está a topologia com o resistor shunt de lado-baixo, que tem um terminal conectado ao terminal terra da bateria (U_1) e o outro terminal conectado à carga. Nesta topologia, utiliza-se um amplificador com dois resistores, R_1 e R_2 , para amplificar a queda de tensão no resistor shunt, e a carga deve ser conectada usando dois fios enquanto o terminal de terra não pode ser utilizado direto num dos terminais da carga por causa da medição no resistor shunt. À direita há outra topologia com o resistor shunt lado-alto, onde a conexão de fios com a carga é simplificada, já que agora a carga pode ser conectada diretamente ao terminal de terra da bateria. Nesta topologia, o circuito de medição requer mais dois resistores, R_3 e R_4 , como divisores de tensão, e deve-se ter atenção com o ajuste de "offset" do circuito e a relação entre os resistores R_1 , R_2 de ganho, e na escolha da relação dos resistores R_3 e R_4 onde o terminal entre eles fixa a tensão de referência que é utilizada na comparação com a tensão em U_2 no terminal do resistor shunt [2].

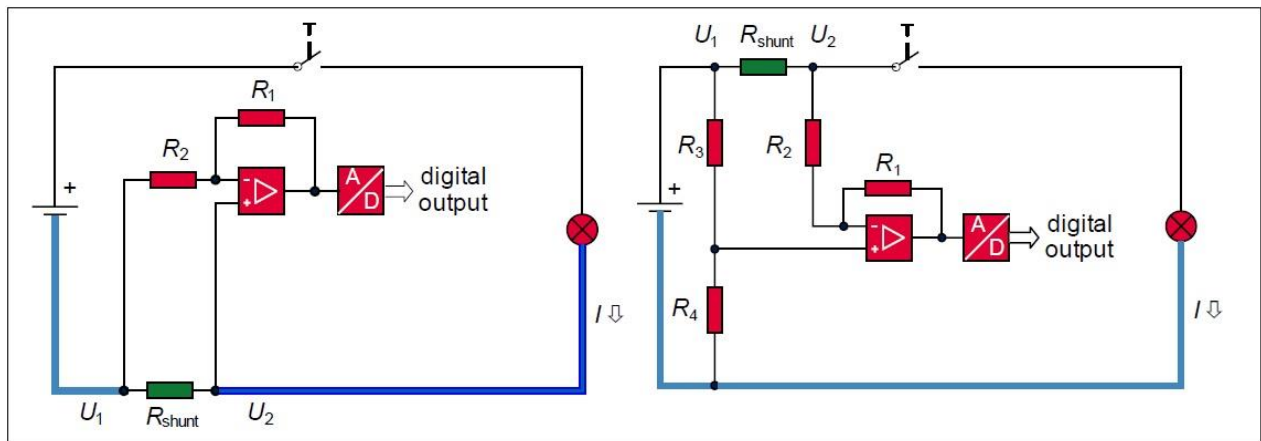


Figura 2 - Extraída de [2]. Medição de corrente usando resistor shunt lado-baixo (esquerda) e resistor shunt lado-alto (direita), onde ΔV é $U_2 - U_1$, e R_{shunt} é o resistor de precisão onde ocorre a queda de tensão necessária para a medição da corrente. R_1 , R_2 são os resistores que ajustam o ganho do amplificador operacional para amplificar a tensão ΔV , e R_3 e R_4 são divisores de tensão. Após ΔV ser amplificado, passa por conversor analógico-digital e depois segue para a saída digital [2].

Mesmo sendo simples, amperímetros com resistor shunt tem vários problemas, como:

- Queda de tensão na medida da corrente: ao medir correntes altas, a tensão em queda no resistor shunt também aumenta, além de aumentar a dissipação de calor. Isso piora a relação sinal/ruído (SNR), e piora a precisão e a exatidão das medidas. De acordo com a referência [2], é aceitável quedas de até 2% em uma aplicação de 5 V por exemplo [2].
- Queda de tensão nos conectores do shunt: Para correntes mais altas, o resistor shunt é normalmente conectado com parafusos, e isso gera uma resistência adicional no circuito e consequentemente um erro de exatidão [2].
- Dissipação de energia no resistor de derivação: Quanto maior a corrente a ser medida, maior é a potência dissipada no resistor shunt, o que exige um resistor cada vez maior e mais caro [2].
- Para medição de correntes elevadas, acima da escala do amperímetro, necessita-se de outro resistor shunt em paralelo com o shunt do amperímetro: Conecta-se ao instrumento um resistor em paralelo ao amperímetro, um segundo resistor shunt externo. Caso o amperímetro deva ser utilizado para uma faixa de medição n vezes superior a existente (fator de amplificação n), então uma parte da corrente passará pelo amperímetro e $(n-1)$ partes devem passar pelo shunt externo. A equação para encontrar o valor do resistor é

$$R_n = \frac{R_i}{n-1} \quad (2)$$

onde R_n é o resistor shunt externo, R_i a resistência interna do amperímetro ou resistor shunt interno, e n é fator de amplificação para se chegar ao valor correto da corrente [3]. A figura 3 abaixo mostra como é feita essa ligação de um resistor shunt externo ao amperímetro para medir corrente elevadas.

Amperímetro

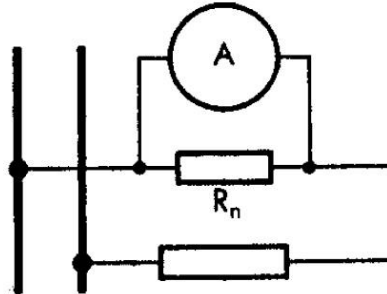


Figura 3 - Extraída de [3]. Amperímetro com resistor shunt externo R_n em paralelo, usado para medir correntes muito altas [3].

Outro método de medição de corrente elétrica é através do campo magnético ou a densidade de fluxo de campo magnético associado à corrente a qual se quer medir. Desse modo, a corrente elétrica pode ser medida através de sensores de efeito Hall [2]. Sensores de efeito Hall são transdutores que, quando estão sob a aplicação de um campo magnético, respondem com uma variação de tensão de saída.

Uma corrente elétrica gera um campo magnético ao redor de um condutor, cuja direção pode ser determinada com a partir da Lei de Ampère [9], a terceira equação das Equações de Maxwell [9]. Abaixo Lei de Ampère na forma integral

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_c + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (3)$$

E a mesma lei de Ampère na forma diferencial

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Sendo I_c a corrente a ser medida na equação 3, e \vec{J} a expressão vetorial desta corrente na equação 4. \vec{B} é densidade fluxo de campo magnético, cuja unidade de grandeza é Wb/m^2 ou T, e está relacionado com a intensidade de campo magnético H pela equação

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (5)$$

Onde μ_r é a permeabilidade magnética do material, e $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ é a permeabilidade magnética no vácuo, cuja unidade de grandeza é $\text{V}\cdot\text{s}/\text{A}\cdot\text{m}$ [2][5].

Da forma integral da Lei de Ampère, chega-se a equação que descreve a intensidade do campo magnético H , em A/m, em volta de um fio, e que é diretamente proporcional à corrente envolvida I e inversamente proporcional à distância do ponto medido no espaço à origem que é o próprio fio

$$H(I, r) = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (6)$$

Da relação entre B e H, chega-se à equação que descreve a densidade de fluxo de campo magnético no espaço ao redor do fio, que é

$$B(I, r) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (7)$$

A densidade do fluxo pode ser medida usando um circuito integrado (do inglês, IC) de efeito Hall. Como a densidade de fluxo magnético B e a intensidade de campo magnético H são grandezas diretamente proporcionais e associadas à corrente I, Eq.6 e 7, é possível medir a corrente elétrica I de forma indireta, com precisão, e sem gerar quedas de tensão no equipamento a ser medido, principalmente se a corrente a ser medida está na escala de Ampères, dezenas ou centenas de Ampères [2][4][5].

O sensor Hall é construído com uma fina camada de material condutor, denominado elemento Hall, com terminais de saída perpendiculares à direção do fluxo da corrente que se quer medir. Quando o elemento Hall é submetido a um campo magnético, ele responde com uma tensão de saída proporcional à intensidade do campo magnético gerado por esta corrente. Como a tensão gerada na saída do elemento Hall é muito pequena (μV), o sensor precisa de componentes eletrônicos adicionais para aumentar o ganho. Quando o elemento Hall é combinado com os componentes eletrônicos associados, ele forma um sensor de efeito Hall [10]. A figura 4 abaixo demonstra o princípio de funcionamento de um sensor Hall.

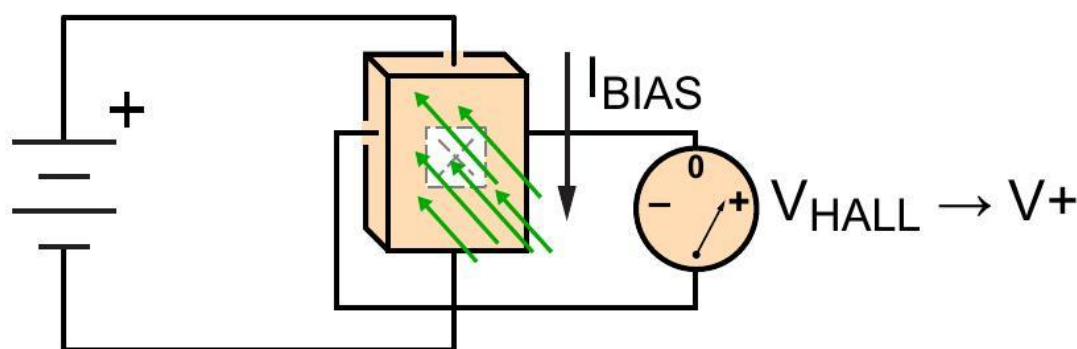


Figura 4 – Extraída de [4]. Um sensor Hall é instalado próximo a um circuito cujo vetor do campo magnético gerado pela corrente é perpendicular à superfície do sensor Hall, e o sensor é alimentado por uma fonte de tensão que gera uma corrente muito pequena. Quando o sensor é submetido a um campo magnético, as cargas tendem a se desviar de sua trajetória normal, acumulando-se numa das faces laterais gerando uma tensão muito pequena (V_H) [4][10]. Esta pequena tensão é proporcional ao fluxo de campo magnético que flui através do sensor, e esse fluxo é proporcional à corrente que elétrica que o gerou, de acordo com a definição da equação 7 [9].

Neste trabalho, realiza-se um estudo da aplicação de sensor IMC-Hall® MLX91205KDC-AAL [5][6][7][8], da fabricante Melexis®, para a medição de corrente elétrica. Esse tipo de medição se adequa melhor ao tipo de equipamento que este trabalho pretende medir devido ao isolamento que esse sensor tem em relação ao circuito cuja corrente deseja-se medir, justamente por não precisar de um resistor shunt para medir a corrente elétrica. A aplicação prática consiste em um carregador de baterias de íon-lítio cuja corrente de carga deve ser monitorada durante a carga, através da medição de corrente CC. Mas para além do nosso caso, esse método pode ser amplamente utilizado em aplicações residenciais para medição e controle de consumo de eletrodomésticos, com medição de corrente CA ou CC, medição de campo magnético de banda larga, conversores AC / DC, controle motores, conversor de energia solar (MPPT), e gerenciamento de energia. [7].

Este sensor IMC-Hall® MLX91205KDC-AAL difere-se dos demais sensores Halls pela sua arquitetura IMC (Integrated Magnetic Concentrator). Em geral, os sensores tipo Hall convencionais tem um único elemento Hall disposto de forma lateral, acompanhando a superfície. Isto faz com que o sensor seja sensível apenas ao campo magnético perpendicular à superfície dos chips com essa arquitetura [5]. A figura 5 abaixo mostra o princípio de funcionamento deste sensor.

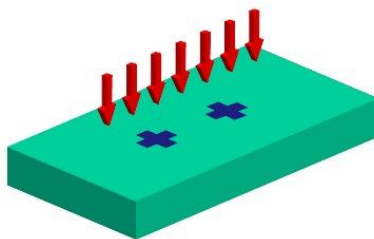


Figura 5 - Extraída de [5]. Sensor Hall convencional, sensível ao campo magnético perpendicular à superfície do chip.

Na tecnologia IMC, são adicionadas duas ilhas de material ferromagnético que formam um espaçamento (gap) entre elas. Isso permite que o chip seja sensível ao campo magnético em paralelo à superfície, e a medição é feita a partir da diferença do fluxo magnético que sai de uma ilha para a outra e que passa pelo espaçamento (gap). A figura 6 abaixo mostra o princípio de funcionamento deste sensor IMC-Hall®. Essa tecnologia melhora o ganho, melhora a relação sinal/ruído e o desempenho com a variação de temperatura [5].

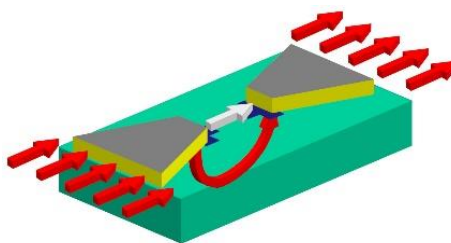


Figura 6 - Extraída de [5]. Sensor IMC-Hall®, sensível ao campo magnético paralelo à superfície do chip.

1.2 Objetivo

A partir da escolha do sensor IMC-Hall MLX91205KDC-AAL [7], este trabalho estuda a aplicação deste sensor para medição de corrente elétrica, projetando amperímetros para a medição de corrente elétrica por efeito de campo magnético. Para esse estudo foram projetados e desenvolvidos três tipos de placas onde o sensor é instalado, combinadas com duas aplicações de duas técnicas que ajudam a concentrar o campo magnético gerado pela corrente elétrica e assim melhorar a resolução das medições [5][6]. A primeira técnica consiste na arquitetura da placa projetada, variando-se o número de voltas da trilha de corrente a ser medida com o sensor [5][6]. A segunda técnica é a instalação de blindagens de NiFe [5][6] com até dois tipos de geometria: tipo R1 [11] e tipo U12 [12].

1.3 Estrutura de trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita a introdução ao tema do trabalho, expondo os diferentes métodos de medição de corrente, objetivando a medição de corrente elétrica utilizando sensor de efeito Hall. No capítulo dois é feita contextualização do sensor Hall escolhido para o trabalho, o MLX91205KDC-AAL [7], onde as especificidades técnicas e aplicações são levantadas. No capítulo três são desenvolvidos projetos de circuitos para o referido sensor Hall, utilizando-se o programa Eagle 7.7 da CadSoft® para elaborar 3 modelos de placas eletrônicas para a utilização do sensor como amperímetro de medição indireta de corrente, além das melhores formas de concentrar o campo magnético gerado pela corrente a fim de melhorar a resolução das medidas. No capítulo quatro são realizados testes e são levantados os dados com a aplicação de diferentes níveis de correntes nas três placas projetadas para a utilização do sensor, com ou sem estruturas de blindagem. Por fim, no capítulo cinco é apresentada a conclusão do trabalho e o resultado do estudo para a aplicação do amperímetro projetado para a medição da corrente do carregador de baterias de lítio-íon.

2. Escolha do sensor IMC-Hall® MLX91205KDC-AAL

Como introduzido, o objetivo deste projeto é desenvolver um amperímetro que possa medir corrente a partir de um sensor Hall sensível ao campo magnético, cuja aplicação tem por objetivo a medição da corrente de carga de um carregador de baterias de Litio-íon de 12600 mAh da fabricante Powerizer®, com corrente de carga de até 6 A em corrente contínua.

Existem dois tipos de sensores de efeito Hall disponíveis para a construção de amperímetros. A partir do estudo das opções de sensores foi realizada comparações entre a tecnologia de sensores Hall convencionais e a tecnologia de sensores IMC-Hall®, da fabricante Melexis®, e constatar qual se adequa melhor ao o objetivo já exposto na introdução.

2.1 Sensores Hall Convencionais

Os sensores Halls convencionais são sensíveis ao campo magnético quando a incidência do vetor de campo está na direção perpendicular em relação à superfície do chip. De forma geral, esses sensores são usados em conjunto com um núcleo de material ferromagnético para que haja maior concentração do campo magnético e que o vetor de campo seja perpendicular à superfície do chip. Para isso o núcleo de material ferromagnético deve ser disposto em torno do fio ou trilha que conduz a corrente elétrica a ser medida, e em um espaçamento entreferro (gap) no núcleo concentra-se o fluxo do campo magnético. O sensor Hall deve ser acoplado neste mesmo dentro do entreferro (gap), que tem geralmente entre 2mm e 5mm de tamanho. A figura abaixo 7 mostra dois tipos de amperímetros com esses sensores.

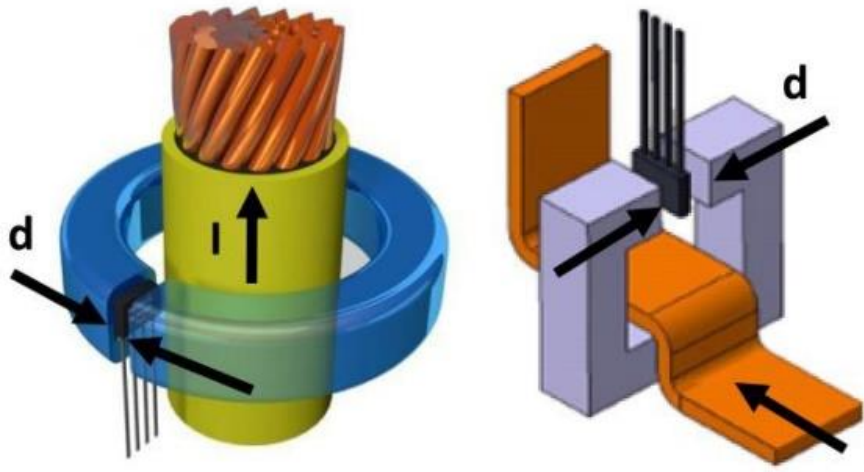


Figura 7 - Extraída de [6]. Dois exemplos de aplicação de um sensor Hall convencional. Em ambos exemplos, é necessário núcleo de material ferromagnético em volta dos condutores de corrente, além de um espaçamento entreferro (gap) onde deve ser colocado o sensor Hall.

Em favor desta aplicação com sensor Hall convencional há o aumento do ganho magnético no núcleo de material ferromagnético e a blindagem contra interferências eletromagnéticas externas (cross-talk). Esta aplicação é mais adequada para medição de correntes médias (de 10A a 100A) e correntes altas (de 100A a 1000A) [6]. Nestas faixas de corrente médias e altas, o erro de linearidade é $\pm 0.25\%$ de fundo de escala, que equivale a $\pm 5\text{mV}$ quando o sinal de saída do sensor tem entre 10% e 90% do valor de tensão de alimentação do sensor (em geral 5V) [8], como mostra a figura 8 a seguir.

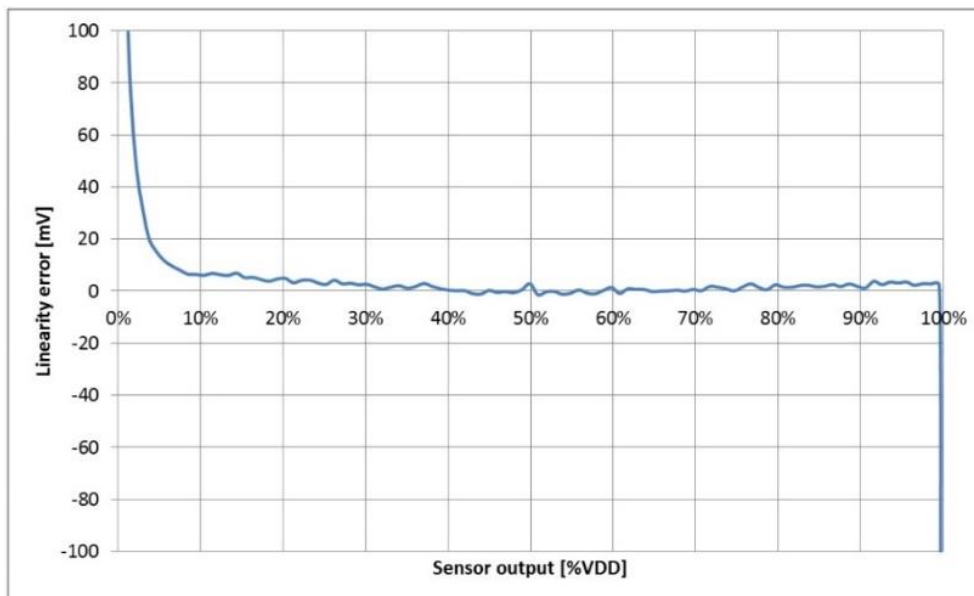


Figura 8 - Extraída de [8]. Erro de linearidade, em mV, de um sensor Hall convencional (MLX91209), em função do nível da tensão de saída, em percentual relativo ao nível de tensão de entrada VDD (5V).

Porém é necessário destacar que o desempenho, em precisão e exatidão, do amperímetro com sensor Hall convencional é limitado pelo projeto do núcleo de material ferromagnético, de acordo com a geometria e o material utilizado. Dependendo do projeto do núcleo, ter-se-ão diferentes parâmetros de saturação, histerese, resposta em frequência e desvio térmico, e conseqüentemente diferentes graus de precisão e exatidão [6]. NA figura 9 abaixo comparam-se os erro de linearidade em μT e a histerese conforme se aumenta e depois diminui a corrente elétrica, variando-se entre 1000 A e -1000A, para três núcleos diferentes construídos cada um com três materiais muito utilizados na construção de núcleos ferromagnéticos, SiFe, 50%NiFe e ferrite [8].

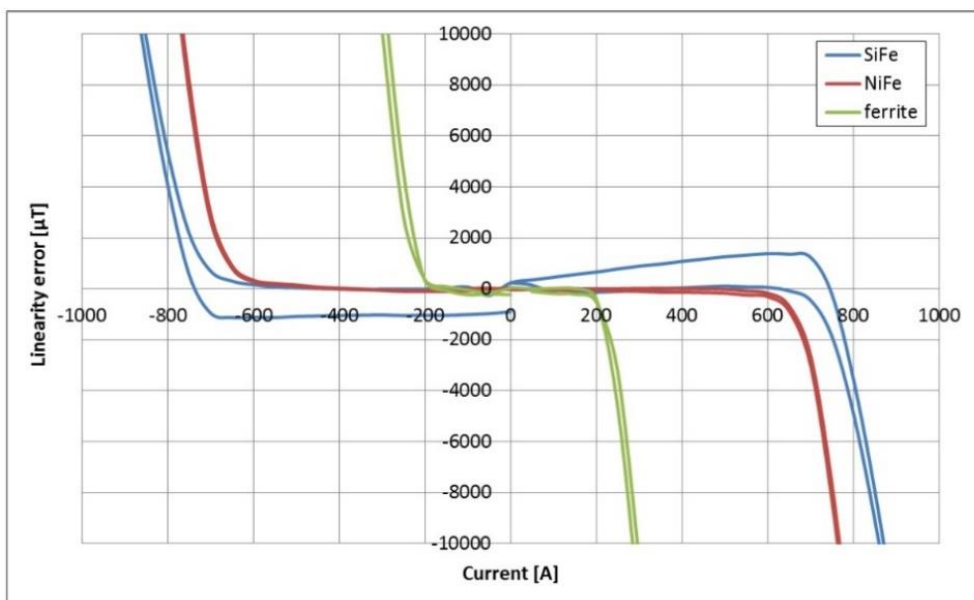


Figura 9 - Extraída de [8]. Histerese e erro de linearidade em μT , em função da corrente aplicada em A, mantendo-se a geometria do núcleo em volta do condutor, mas modificando-se o material ferromagnético com três diferentes materiais [8].

Na figura 10, compara-se o erro de linearidade, em [A], quando se varia a corrente entre 0 e 2000A, para 4 diferentes geometrias muito utilizadas na construção de núcleos, com o mesmo material ferromagnético que neste caso é 50%NiFe.

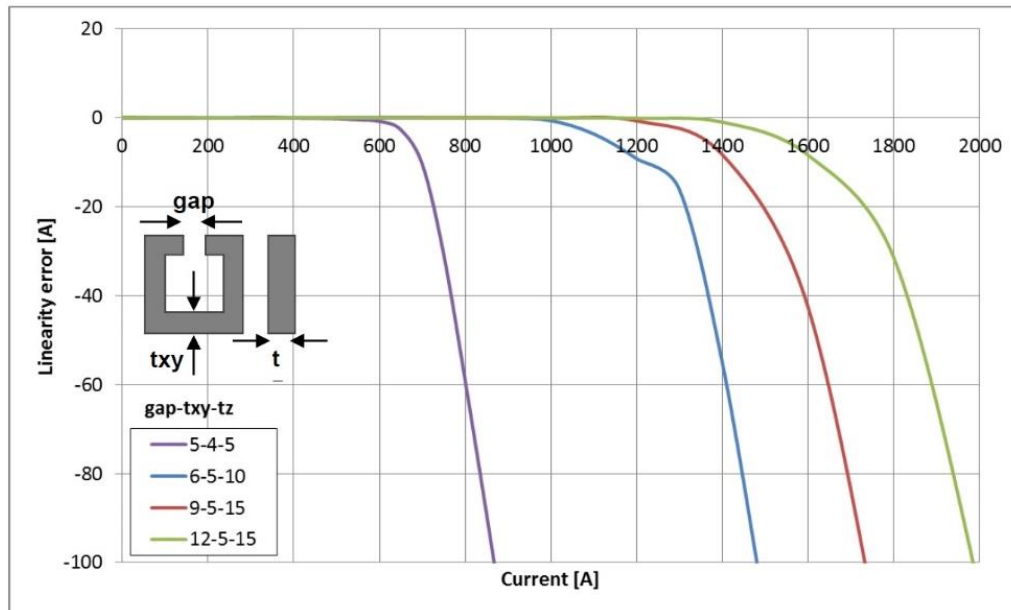


Figura 10 - Extraído de [8]. Erro de linearidade, em [A], em função da corrente aplicada em [A], mantendo-se o mesmo material (50%NiFe) do núcleo em volta do condutor, mas modificando-se os parâmetros de geométricos do núcleo para comparar até 4 tipos de núcleos diferentes.

Como visto, em baixas correntes (até 10A) a medição perde exatidão, pois quando o nível de tensão do sinal de saída está fora do intervalo entre 10% e 90% do tesão de alimentação do sensor (VDD), o erro de linearidade aumenta até 100mV [8]. Além disso o desempenho do amperímetro com este sensor é muito dependente do material e da geometria do núcleo ferromagnético utilizado [6]; devida a esta dependência, um amperímetro com projetado com um sensor Hall convencional possui tamanho e peso maiores que um amperímetro construído com sensores IMC-Hall® [6]. Por isso, esses fatores inviabilizam a construção de amperímetro com precisão e exatidão para medir correntes de até 10A, tal como o objetivo deste trabalho.

2.2 Sensores IMC-Hall®

A tecnologia IMC (integrated magnetic concentrator), desenvolvida pela fabricante Melexis®, foi inspirada na clássica combinação de sensor Hall convencional com um núcleo ferromagnético concentrador de fluxo de campo magnético, onde o sensor Hall é colocado no espaçamento entreferro do núcleo ferromagnético. A novidade da tecnologia IMC consiste em adicionar no chip, rente ao próprio sensor Hall, uma camada de material ferromagnético de tipo macio, de alta permeabilidade e baixo campo coercitivo, distribuído em duas partes em forma de ilha e com um espaçamento (gap) entre elas [5].

Estas ilhas de material ferromagnético são os concentradores de campo magnético, utilizadas para amplificar o campo paralelo à superfície do chip. O espaçamento entre as ilhas de material ferromagnético faz o fluxo de campo manter o circuito magnético entre as ilhas redirecionando o vetor de campo magnético, rotacionando o vetor, saindo de uma ilha para a outra, e consequentemente atravessando perpendicularmente o elemento Hall do sensor. O componente vetorial perpendicular do campo magnético é mais forte próximo ao espaçamento entre as ilhas, e é medido pelos elementos Hall laterais aos concentradores [5]. A figura 11 mostra como é a arquitetura do chip e como funciona o sensor.

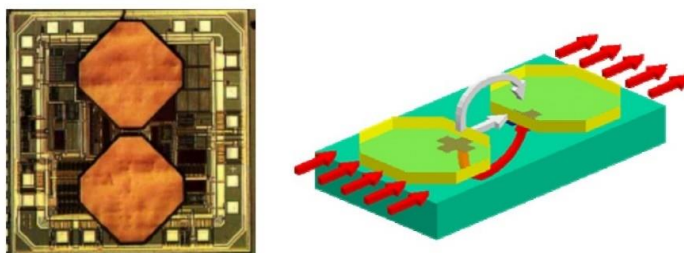


Figura 11 - Extraída de [6]. Na esquerda uma fotografia da arquitetura do interna do chip com as duas ilhas IMC bem visíveis. À direita, o IMC transforma o campo magnético paralelo à superfície do chip em campo perpendicular, detectado pelo elemento Hall do chip.

Devido a tecnologia IMC, os sensores IMC-Hall® são sensíveis aos campos magnéticos paralelos à superfície do chip, o que permite medir a corrente que flui em um barramento, fio, ou trilha de uma placa situada abaixo do encapsulamento do chip, sem que para isso seja necessário um núcleo ferromagnético, devido ao ganho proporcionado pela própria tecnologia IMC [6], como mostra a figura 12 abaixo.

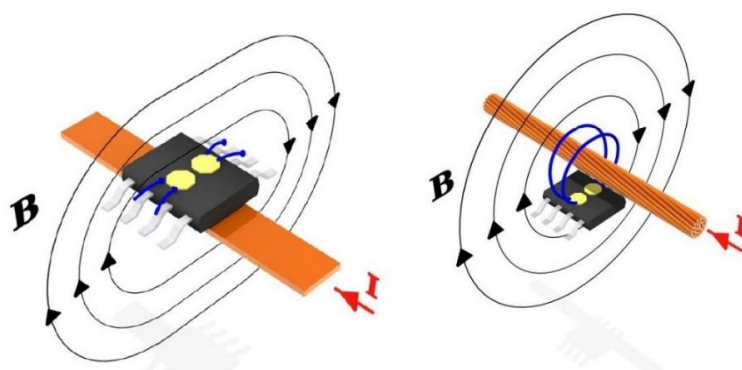


Figura 12 - Extraída de [6]. Sensor IMC-Hall® em duas aplicações. À esquerda, o sensor mede a corrente elétrica que passa por uma trilha de uma placa, próxima à superfície inferior do chip. À direita o sensor mede a corrente que passa por um fio próximo a superfície superior do chip.

A fabricante Melexis® disponibiliza até três versões diferentes de sensores IMC-Hall®, classificados de acordo com a sensibilidade e operação em três faixas de intensidade de campo magnético: LF (Low Field), HF (High Field), VHF (Very High Field). O VHF e HF possuem os menores IMCs e ganhos magnéticos, e por isso são adequados para medição de correntes médias (entre 10A e 100A) e correntes altas (entre 100A e 1000A). O LF possui o maior IMC, com ganho magnético alto e maior sensibilidade (entre 100 e 700 mV/mT), o que o torna melhor em aplicações para medir baixas correntes (até 10A), e que é justamente o objetivo deste trabalho [6]. A figura 13 abaixo mostra a sensibilidade em cada versão.

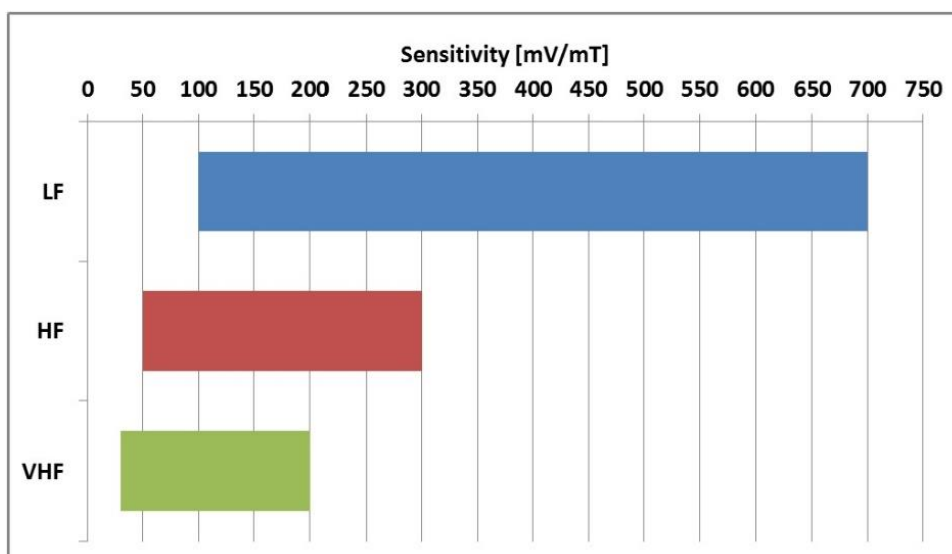


Figura 13 - Extraída de [6]. Faixas de sensibilidade para cada um dos três tipos de sensores IMC-Hall®.

Cada um desses três sensores são ideais para uma específica faixa de intensidade de campo magnético, de acordo com o erro de linearidade. O sensor LF é ideal para campos magnéticos mais fracos, com até 10mT de intensidade. Já os sensores HB e VHB são ideais até 25mT e 60mT de intensidade de campo, respectivamente [5][6][7][8]. A figura 14 abaixo mostra o erro de linearidade, em percentual do campo magnético nominal aplicado, quando se aumenta progressivamente a intensidade do campo magnético na superfície dos três tipos de sensores até 80mT. O resultado é a determinação do limite de operação de cada um dos sensores.

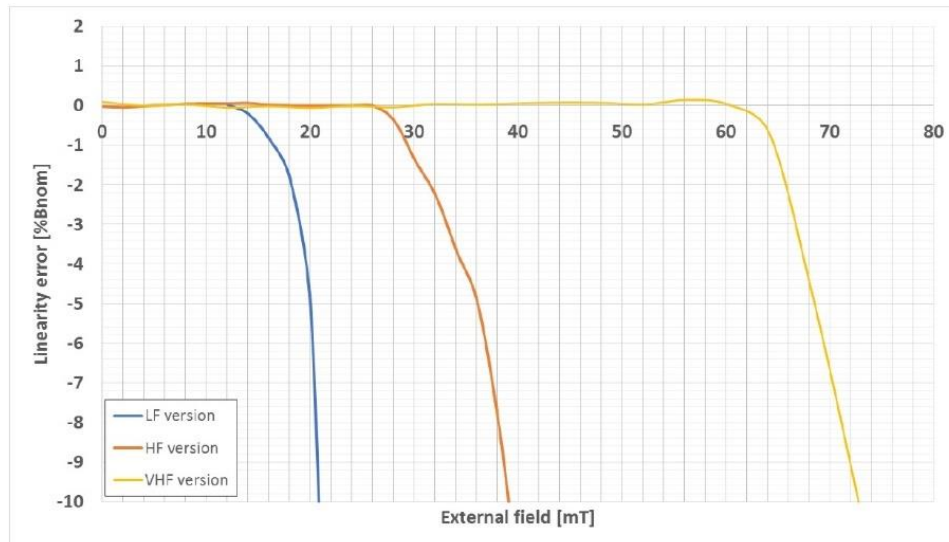


Figura 14 - Extraída de [6]. Erro de linearidade, em percentual do campo aplicado, em função da intensidade do campo magnético aplicado em paralelo à superfície dos sensores IMC-Hall®.

A tabela 1 a seguir relaciona as principais propriedades, geometria, limite de intensidade de campo magnético detectável sem erro (range), e o ganho IMC, para cada um dos três tipos de sensores IMC-Hall®, de forma que é possível comparar as diferenças entre eles.

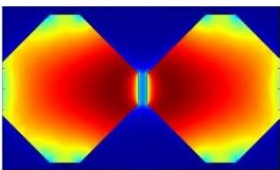
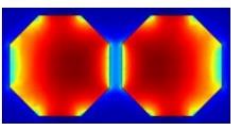
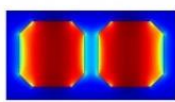
	Low field	High field	Very high field
Gain	6x	3x	1.8x
Range	10mT	25mT	60mT
Geometry			

Tabela 1 – Extraída de [8]. As três principais características relacionadas a cada um dos tipos de sensores.

Após a análise das características destes três tipos de sensores IMC-Hall®, chegou-se à conclusão que o melhor sensor para a projeto em questão é o sensor LF, de modelo cujo código é MLX91205KDC-AAL [7]. Ele é ideal para medir correntes de até 10A, com sensibilidade programada de fábrica de 280 mV/mT com faixa de intensidade de campo magnético $\pm 10\text{mT}$, erro de linearidade de $\pm 0.5\%$ do fundo de escala, operação entre -40°C e 125°C com desvio térmico (thermal offset) de até $\pm 50\text{mV}$ (sendo 0mV o desvio em 25°C), desvio de tensão (offset voltage) até $\pm 20\text{mV}$ [7].

Neste chip MLX91205 não há a possibilidade de se programar o ganho e a sensibilidade e possui apenas saída analógica. No entanto o chip MLX91206 [6] possui ganho e sensibilidade programável e saída digital com PWM (pulse width modulation), porém mais caro.

3. Projeto do amperímetro

A partir da escolha do sensor IMC-Hall®, modelo MLX91205KDC-AAL, pode-se projetar o amperímetro. Pelo datasheet [7], o encapsulamento (package) do chip é SOIC-8, um encapsulamento SMD (surface mounted components) feito para soldar os terminais do chip na superfície de placas de circuito impresso, além de ter dimensões muito reduzidas possibilitando projetar placas pequenas. Abaixo, na figura 15, o desenho e as dimensões do encapsulamento do chip [7].

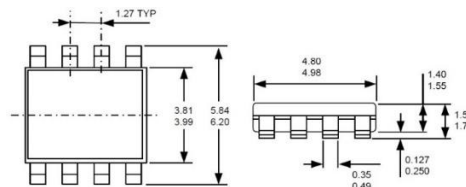


Figura 15 - Extraída de [7]. Encapsulamento (package) SOIC-8 do chip MLX91205, dimensões em [mm]

No capítulo 2 foi visto que é possível construir o amperímetro para monitoramento do carregador de baterias de lítio-íon, e medir a corrente de carga de até 6A, com o sensor IMC-Hall® MLX91205-AAL. Porém a resolução depende da sensibilidade do sensor como amperímetro em mV/A, e há de técnicas que ajudam a concentrar o campo magnético que passa paralelo à superfície do chip [5][6], e com isso atingir a maior densidade de fluxo magnético possível com o sensor, neste caso 10mT, com a corrente máxima da escala que queremos medir. As técnicas que melhoram a resolução são três: estreitamento da largura da trilha embaixo do chip, fazer enrolamentos ou voltas com a trilha embaixo do chip, aplicação de blindagem de materiais ferromagnéticos envolta do chip e da trilha [5][6].

Essas três técnicas são baseadas nas equações 8 e 9 abaixo, desenvolvidas a partir da equação 7, e que descrevem as densidades de fluxo de campo magnético ao redor do fio e ao redor de uma trilha:

$$B(I, r) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (8)$$

$$B(I, W, H) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{2 \cdot (W + 2 \cdot H)} \quad (9)$$

Onde B é a densidade de fluxo de campo magnético, I é a corrente no fio ou na trilha, N é o número de voltas ou enrolamentos do fio ou trilha que conduz a corrente, r é a distância em relação ao fio condutor e H a distância da trilha condutora, W é a largura da trilha, μ_0 e μ_r são respectivamente permeabilidades magnéticas no vácuo e do material [5][9].

A partir destas equações foi possível chegar às conclusões que embasaram as técnicas desenvolvidas para melhorar a resolução do sensor IMC-Hall®:

- Quanto mais curta a distância da linha de campo magnético em relação ao condutor, maior será a densidade de fluxo de campo. Consequentemente, a menor distancia do condutor (r e H) possibilita mais intensidade de campo; e consequentemente uma trilha condutora com largura menor (W) aumenta a densidade de fluxo de campo em volta do condutor [5];
- Quanto mais enrolamentos ou voltas (N) tiver, maior será a densidade de fluxo de campo magnético envolta do fio ou trilha condutora de corrente [5];
- Quanto maior a permeabilidade (μ_r) magnética, maior será a densidade de fluxo de campo magnético. Para isso é necessário adicionar uma blindagem o mais próximo possível do condutor e com menor espaçamento entreferro possível (air gap), para concentrar o fluxo de campo magnético em um meio de maior permeabilidade. Também é importante definir a melhor geometria da blindagem, pois diferentes geometrias proporcionam diferentes densidade do fluxo no mesmo meio [5].

Para estudar e explorar melhor as técnicas descritas para melhorar a sensibilidade e resolução do sensor, serão projetadas três placas, placa 1, placa 2 e placa 3, cada uma com um, dois e três enrolamentos de trilha de corrente, respectivamente, além de terem redução de largura de trilha e espaços para o encaixe de dois tipos de blindagens.

Antes de projetar a placa de circuito impresso é necessário desenhar o diagrama esquemático do circuito com o sensor, conforme o diagrama no datasheet do sensor IMC-Hall® MLX91205 [7]. Abaixo, nas figuras 16 o diagrama esquemático da placa desenhado, baseado nos exemplos do datasheet, demonstrados nas figuras 17 e 18.

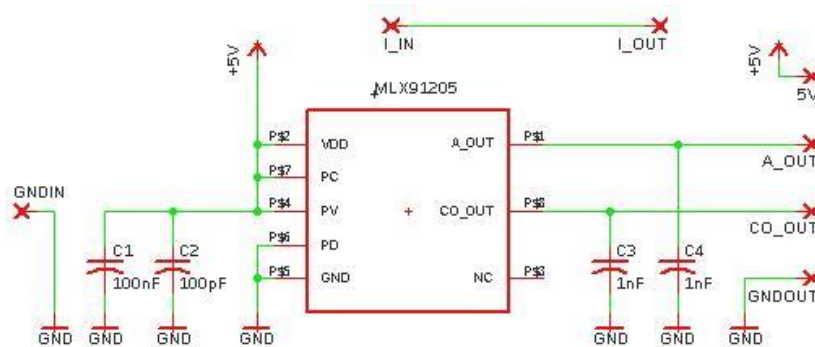


Figura 16 – Diagrama esquemático das placas desenhado no Eagle7.7®.

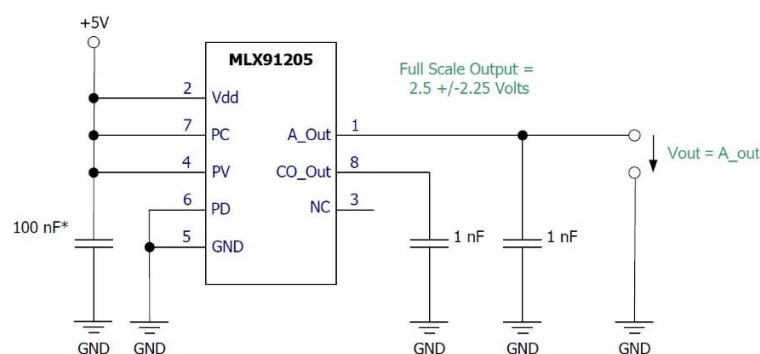


Figura 17 – Extraída de [7]. Diagrama esquemático com a saída de tensão simples, onde a corrente nula corresponde a 2,5V e fundo de escala podendo excursionar entre 0,25V e 4,75V.

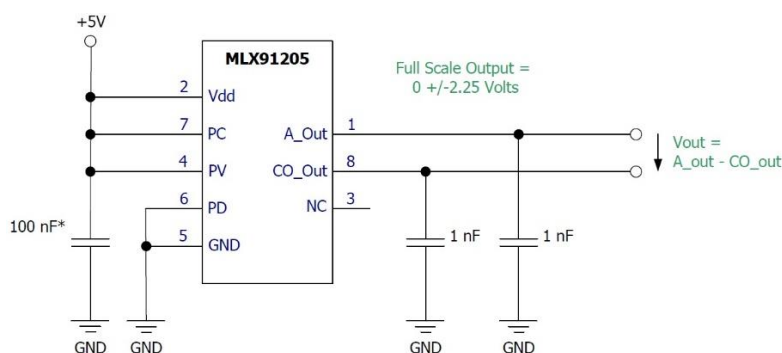


Figura 18 – Extraída de [7]. Diagrama esquemático com a saída de tensão diferencial, onde a corrente nula corresponde a 0V e fundo de escala podendo excursionar entre -2.25V e 2.25V.

3.1 Estreitamento de largura da trilha

A partir da equação 9, desenvolveu-se a técnica que consiste em diminuir a largura da trilha localizada abaixo do sensor para concentrar o campo magnético na superfície do sensor IMC-Hall®, como mostra os exemplos da figura 19 e figura 20.

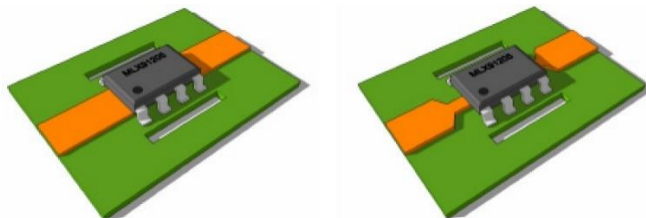


Figura 19 - Extraída de [5]. À esquerda, um sensor MLX91205 com a trilha passando por baixo sem estreitamento. À direita, sensor com a trilha estreitada apenas abaixo do sensor.

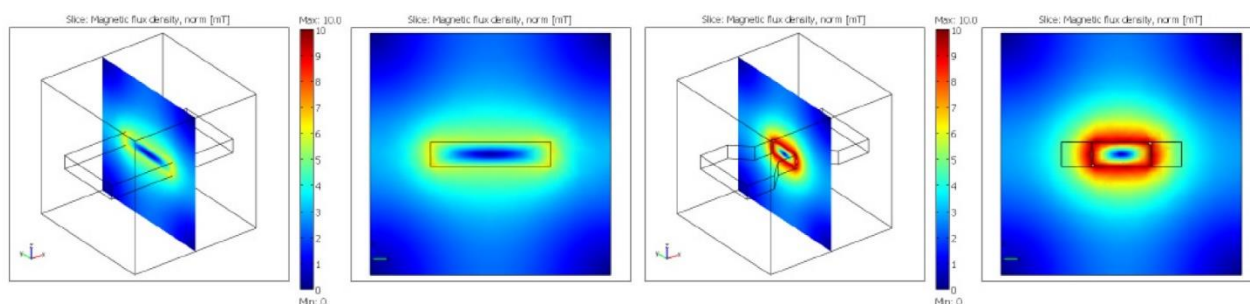


Figura 20 – Extraída de [5]. À esquerda, densidade de fluxo de campo magnético, em mT, envolta da trilha de corrente sem estreitamento. À direita, a densidade de fluxo magnético na trilha estreitada e com mesma corrente.

Neste projeto foram desenvolvidas três placas, utilizando o programa Eagle 7.7 da fabricante Cadsoft®, e já na primeira delas, denominada placa 1, esta técnica de estreitamento de trilha foi aplicada, como mostram abaixo as figuras 21 e 22.

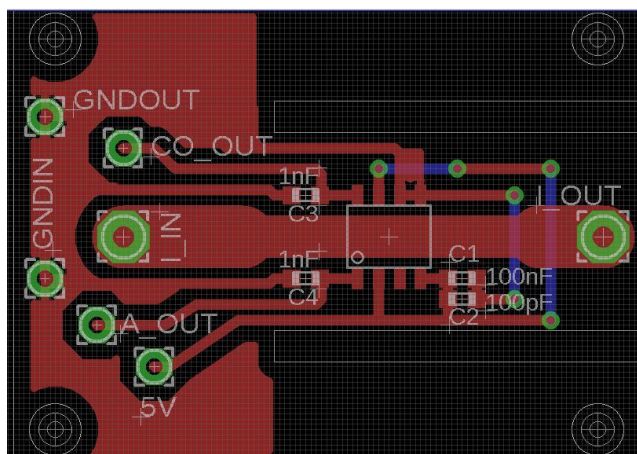


Figura 21 – Placa 1 projetada no software Eagle7.7, com apenas uma trilha de corrente estreitada.

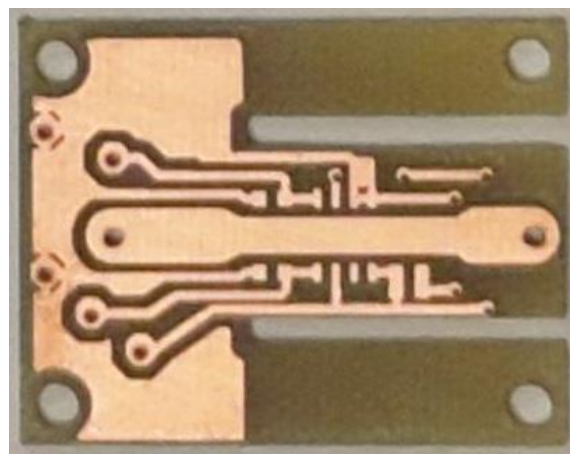


Figura 22 - Placa 1 fresada.

3.2 Placas com diferentes enrolamentos de trilha de corrente

A outra técnica utilizada para aumentar a densidade de fluxo magnético consiste em projetar enrolamentos (loops) de trilha de corrente, como na figura 23. Espera-se que a cada volta extra da trilha faça com que o campo magnético gerado em torno dos enrolamentos seja cerca de duas vezes mais intenso, como mostra a figura 24.

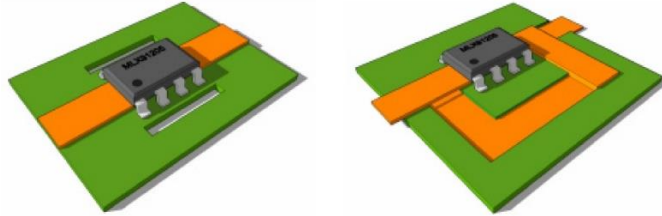


Figura 23 - Extraída de [5]. À esquerda, um sensor MLX91205 com a trilha passando por baixo, sem enrolamento. À direita, sensor com a trilha fazendo um enrolamento abaixo do sensor e da face superior.

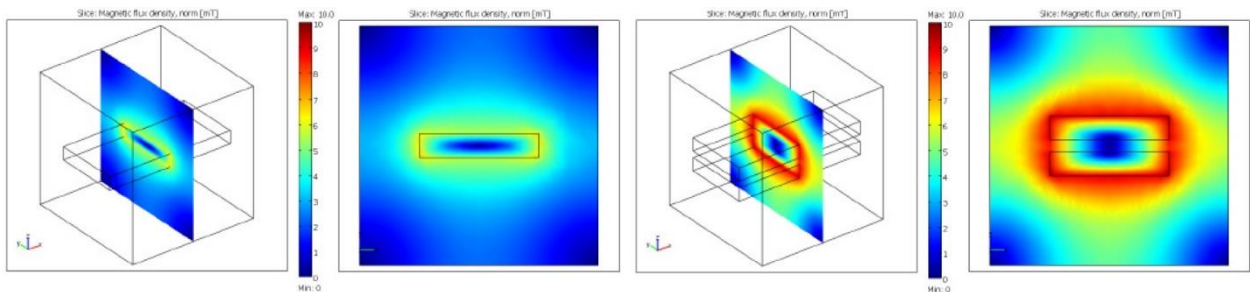


Figura 24 - Extraída de [5]. À esquerda, densidade de fluxo de campo magnético, em mT, envolta da trilha de corrente sem enrolamento. À direita, a densidade de fluxo de campo magnético em volta do enrolamento de $N=2$ com a trilha mantendo a mesma largura e com mesma corrente.

Além da placa 1 com uma única trilha, sem enrolamento, foram desenvolvidas outras duas placas, placa 2 e placa 3, nas quais se utiliza a técnica com enrolamentos extras, com a trilha de corrente dessas placas fazendo duas e três voltas, respectivamente, como mostram as figuras 25, 26, 27 e 28. Porém, diferente do exemplo anterior, em que uma trilha passa por baixo da outra em camadas de faces diferentes, nesses dois projetos os enrolamentos ficam na mesma face da placa, a face superior, e para que isso seja possível, é necessário estreitar a trilha de corrente nas duas placas.

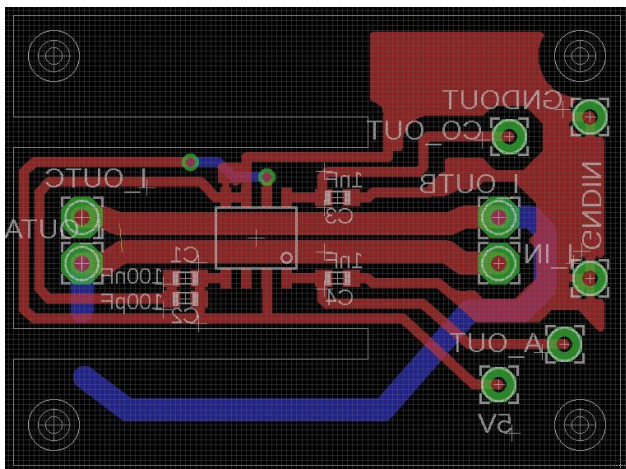


Figura 25 - Placa 2 projetada no software Eagle7.7, com dois enrolamentos e trilha de corrente estreitada.

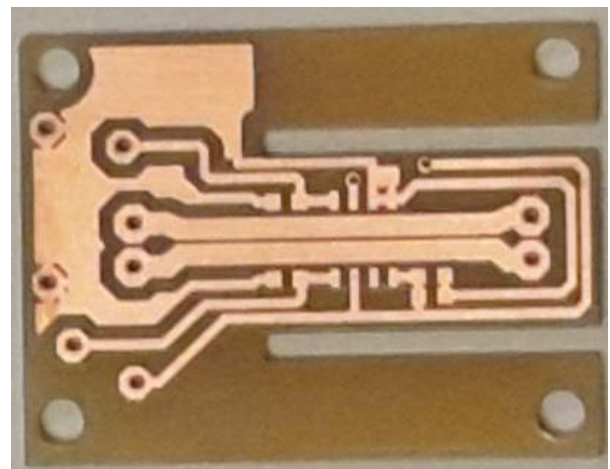


Figura 26 - Placa 2 fresada.

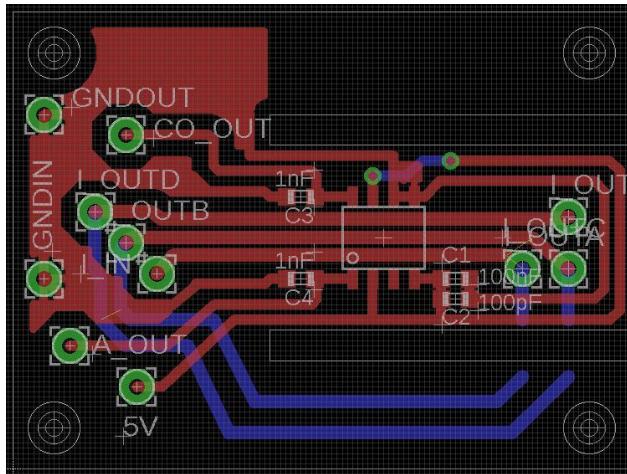


Figura 27 - Placa 3 projetada no software Eagle7.7, com três enrolamentos e trilha de corrente estreitada.

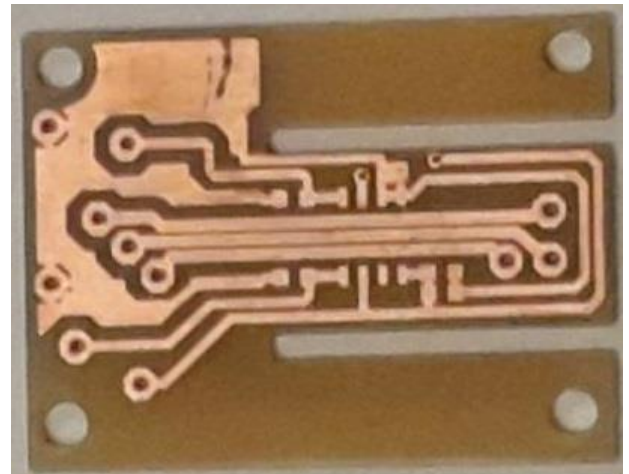


Figura 28 - Placa 3 fresada.

3.3 Blindagens

A última técnica para se aumentar a densidade de fluxo de campo magnético na superfície do sensor consiste em envolver a trilha de corrente ou enrolamentos com uma blindagem. Estas blindagens são constituídas de vários materiais ferromagnéticos, como ferrite, NiFe, SiFe. Cada material desses tem propriedades diferentes: permeabilidade magnética, histerese, saturação, campo coercitivo entre outras, como descrito na tabela 2. As blindagens podem ser projetadas com diferentes geometrias, e a combinação destes dois fatores, material e geometria, proporciona diferentes ganhos na concentração da densidade de fluxo magnético na superfície do sensor e consequentemente ganho na sua sensibilidade.

Material type	Sat. current [A]	B _{SAT} (core) [mT]	B _{SAT} (air gap) [mT]	Hysteresis [μT]	Hysteresis [A]
SiFe	750	1500	187	1000	4
50%NiFe	650	1300	162	≤ 100	≤ 0.4
ferrite	250	500	65	100	0.4

Tabela 2 – extraída de [8]. Propriedades dos três tipos de materiais ferromagnéticos citados (em negrito, valores independentes da geometricamente).

Quando se adiciona uma blindagem, seja em forma de U ou em forma retangular, a densidade de fluxo do campo magnético é concentrada dentro da blindagem. Isso ocorre porque a permeabilidade magnética do ar é menor que a permeabilidade na blindagem, e isso faz com que a relutância (resistência magnética) seja menor na blindagem do que no ar, com o fluxo de campo magnético fluindo mais no espaçamento ou entre os dois lados da blindagem ou entreferro [5][9]. A blindagem também protege contra interferências de campos magnéticos próximos [5][6]. A figura 29 mostra instalação de uma blindagem tipo U, e a figura 30 mostra a densidade de fluxo de campo magnético numa trilha sem blindagem e com blindagem.

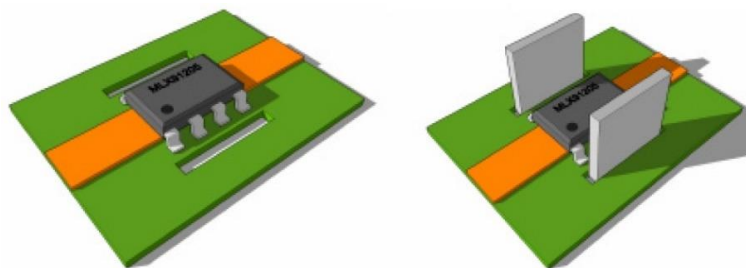


Figura 29 – Extraída de [5]. À esquerda, um sensor MLX91205 com a trilha passando por baixo e sem blindagem. À direita, sensor com a mesma trilha, fluindo a mesma corrente, porém uma blindagem envolvendo a o sensor com a trilha embaixo.

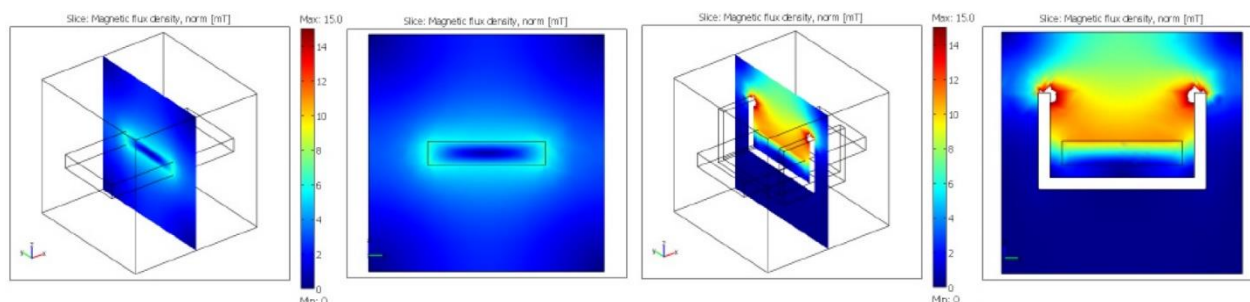


Figura 30 – Extraída de [5]. À esquerda, densidade de fluxo de campo magnético, em mT, envolta da trilha de corrente sem blindagem. À direita, a densidade de fluxo de campo magnético aumenta no espaço entre os dois lados da blindagem com geometria tipo U.

Neste trabalho, por recomendação da fabricante do sensor IMC-Hall® [8], são utilizadas duas blindagens fabricadas pela Maglab®, de material composto de 48%Ni e 52%Fe, porém com duas geometrias diferentes, em forma de U e em forma retangular, classificados pela fabricante U12 e R1 respectivamente [11][12]. A figura 31 abaixo mostra as diferenças de geometria entre estes dois tipos de blindagens.

View	Dimension [mm]

Figura 31 – Extraída de [6]. Geometrias das duas blindagens de 48%NiFe, U12 e R1.

O amperímetro projetado pelo fabricante apresentado na referência [6], projetado com apenas uma trilha de corrente e sem enrolamentos, foram comparadas as sensibilidades sem blindagem, com blindagem de tipo U12 e blindagem de tipo R1 [6]. Na figura 32, compara-se a sensibilidade de amperímetro da fabricante com a blindagem U12, de 65mV/A, com a sensibilidade do mesmo amperímetro sem blindagem, em 40mV/A, e com isso se observa um aumento de mais 50% na sensibilidade [6].

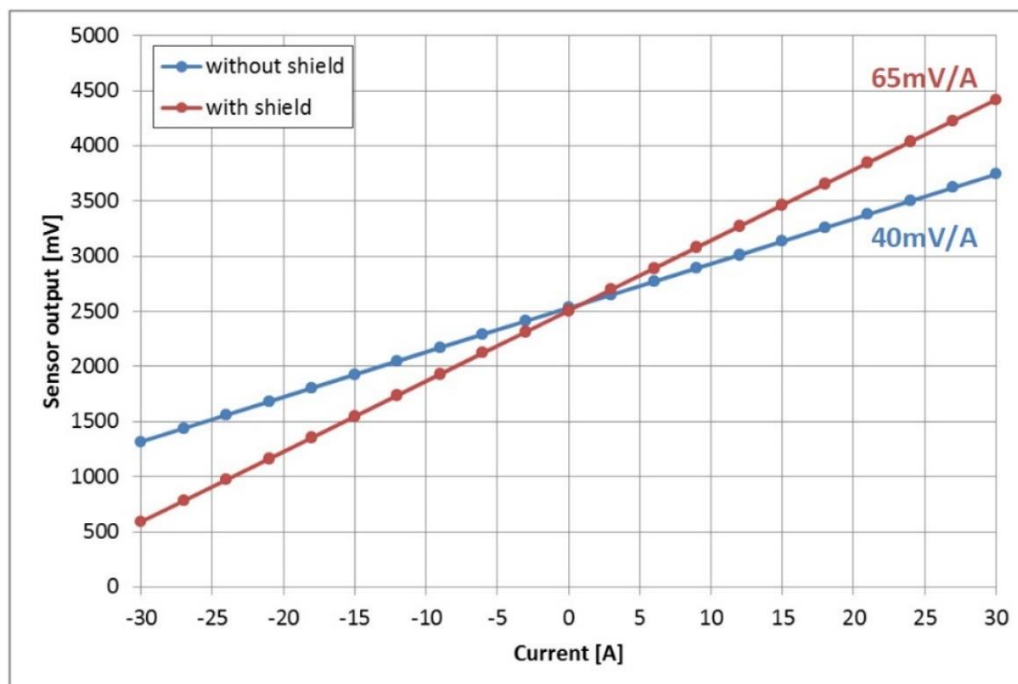


Figura 32 – Extraída de [6]. Saída do sensor em um amperímetro com apenas uma trilha condutora. Em azul a saída do sensor em função da corrente quando o amperímetro está sem blindagem; e em vermelho a mesma saída quando utilizado uma blindagem de NiFe de geometria U12.

A blindagem R1 permite uma melhor resolução, com um aumento ainda maior de sensibilidade, em 167mV/A, como mostra a figura 33. Portanto é esperado que o aumento de sensibilidade do amperímetro com blindagem R1 seja maior que com a blindagem U12 [6], e por isso é melhor para medir correntes baixas (até 10A) ou até 6A especificamente no caso da aplicação em questão, objeto deste estudo.

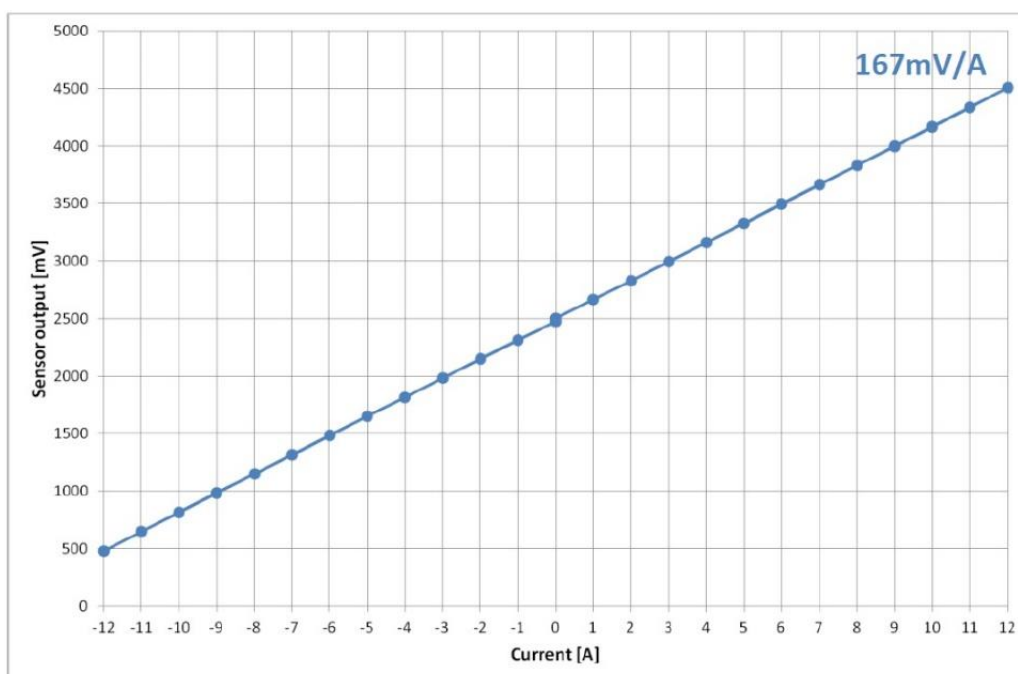


Figura 33 – Extraída de [6]. Saída do sensor em um amperímetro, com apenas uma trilha condutora e com blindagem de NiFe e geometria R1, em função da corrente. Sensibilidade de 167mV/A.

4. Avaliação experimental

A partir do estudo das técnicas descritas no capítulo 3, foram projetadas três placas diferentes, com estreitamento da trilha e variando-se o número de voltas da trilha de corrente, de 1 até 3 voltas, como forma de melhorar a resolução da medida. Também foram usados 2 tipos diferentes de blindagem de 48%NiFe fabricados pela MAGLAB®, com geometria R1 e geometria U12, cuja finalidade é concentrar das linhas de campo magnético e, consequentemente, melhorar a resolução da medida do sensor.

Com isso foi possível projetar até nove amperímetros diferentes, a partir das combinações entre as três placas projetadas, sem blindagem ou com até duas blindagens de geometrias diferentes e mesmo material, tendo como objetivo estudar a sensibilidade e a resolução de cada amperímetro, a fim de decidir qual deles o melhor para monitorar o carregador de baterias de lítio-íon. As figuras 34, 35 e 36 abaixo têm três amperímetros, cada um deles com a blindagem de 48%NiFe e de geometria R1.

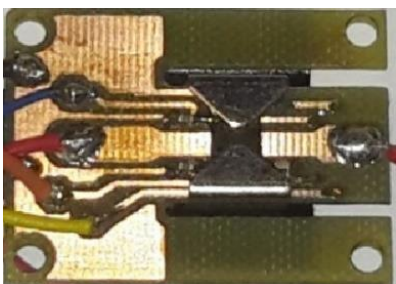


Figura 34 - Amperímetro resultante da combinação entre a placa 1, com apenas uma trilha de corrente, sem enrolamento, com a blindagem R1.

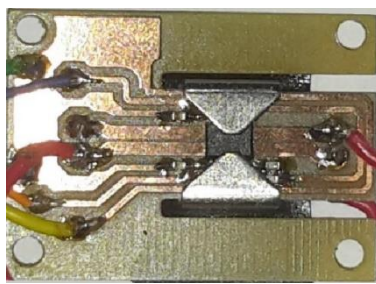


Figura 35 - Amperímetro resultante da combinação entre a placa 2, com enrolamento de trilha com duas voltas, com a blindagem R1.

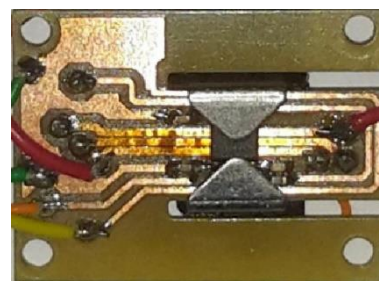


Figura 36 - Amperímetro resultante da combinação entre a placa 3, com enrolamento de trilha com três voltas, com a blindagem R1.

Para verificar a precisão e a exatidão do sensor hall na medição de corrente, em cada uma dessas nove combinações, foram levantadas as medidas de corrente elétrica de -3A até 3A, passando-se pelo 0 (sem corrente) e variando-se a corrente a cada 1 A, com precisão de 1mA, usando a fonte de bancada Agilent® E3631A e comparando com a leitura do multímetro Fluke® 189 em modo de amperímetro.

A fim de fazer a leitura da tensão na saída do sensor, foi utilizado um osciloscópio Tektronix® TBS 1202B em escalas de 50mV/Div e 100us/Div, fazendo até 2482 medidas, das quais foram calculadas as médias, desvios padrão e coeficientes de variação associados à corrente variando sempre 1A, excursionando-a de -3A até 3A, para cada uma das nove combinações de placas e blindagens.

Os resultados das medidas realizadas neste procedimento, com médias, desvios padrão e coeficientes de variação estão na tabela 3, a seguir. Estes três dados são definidos pelas equações matemáticas 10, 11 e 12 abaixo [13].

$$\mu = E[X] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Media ou valor esperado

(10)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

Desvio padrão.

(11)

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}$$

Coefficiente de variação.

(12)

Nestas equações, μ é a média ou valor esperado, N é o número total de medidas, x_i é o resulta da medida no instante i entre 1 e N , σ é o desvio padrão e C_v é o coeficiente de variação. Sendo as equações 10 e 11 relativas aos casos discretos, sendo N e i números inteiros naturais diferente de zero do Conjunto \mathbf{N}^* .

			Corrente medida pelo sensor hall							Unidade
Placa de 1,2 ou 3 voltas com o tipo de blindagem (U12, R1, sem blindagem)	Tipo de dado levantado a partir das 2472 medidas em cada um dos 7 níveis de correntes circulando	Nº de voltas do enrolamento	-3,0000	-2,0000	-1,000	0,0000	1,0000	2,0000	3,0000	A
placa3 blindagem R1	Média	3	1,5039	1,8352	2,1529	2,4822	2,7902	3,1243	3,4470	V
	Desvio padrão		0,0068	0,0069	0,0069	0,0069	0,0070	0,0072	0,0068	V
	Coeficiente de variação		0,0035	0,0031	0,0030	0,0027	0,0024	0,0023	0,0022	V/V
placa3 blindagem U12	Média	3	2,0305	2,1748	2,3249	2,4713	2,6183	2,7716	2,9221	V
	Desvio padrão		0,0067	0,0069	0,0069	0,0070	0,0069	0,0071	0,0068	V
	Coeficiente de variação		0,0033	0,0032	0,0030	0,0028	0,0026	0,0026	0,0023	V/V
placa3 sem blindagem	Média	3	2,1902	2,2831	2,3788	2,4726	2,5693	2,6607	2,7587	V
	Desvio padrão		0,0069	0,0068	0,0069	0,0069	0,0069	0,0071	0,0067	V
	Coeficiente de variação		0,0032	0,0030	0,0029	0,0028	0,0027	0,0027	0,0024	V/V
placa2 blindagem R1	Média	2	1,8533	2,0562	2,2742	2,4847	2,6940	2,8970	3,1197	V
	Desvio padrão		0,0064	0,0064	0,0067	0,0066	0,0064	0,0068	0,0067	V
	Coeficiente de variação		0,0035	0,0031	0,0030	0,0027	0,0024	0,0023	0,0022	V/V
placa2 blindagem U12	Média	2	2,2033	2,2994	2,3938	2,4842	2,5817	2,6757	2,7710	V
	Desvio padrão		0,0064	0,0063	0,0063	0,0065	0,0064	0,0063	0,0065	V
	Coeficiente de variação		0,0029	0,0027	0,0026	0,0026	0,0025	0,0024	0,0023	V/V
placa2 sem blindagem	Média	2	2,2897	2,3594	2,4264	2,486	2,5498	2,6120	2,6777	V
	Desvio padrão		0,0066	0,0064	0,0065	0,0065	0,0063	0,0063	0,0065	V
	Coeficiente de variação		0,0029	0,0027	0,0027	0,0026	0,0025	0,0024	0,0024	V/V
placa1 blindagem R1	Média	1	2,1896	2,2936	2,3955	2,4971	2,6017	2,7046	2,8077	V
	Desvio padrão		0,0066	0,0066	0,0064	0,0067	0,0068	0,0066	0,0069	V
	Coeficiente de variação		0,0030	0,0029	0,0027	0,0027	0,0026	0,0024	0,0024	V/V
placa1 blindagem U12	Média	1	2,3400	2,3919	2,4417	2,4998	2,5494	2,6019	2,6565	V
	Desvio padrão		0,0065	0,0067	0,0070	0,0066	0,0068	0,0063	0,0063	V
	Coeficiente de variação		0,0028	0,0028	0,0029	0,0026	0,0027	0,0024	0,0024	V/V
placa1 sem blindagem	Média	1	2,3828	2,4199	2,4618	2,4974	2,5353	2,5729	2,6131	V
	Desvio padrão		0,0065	0,0069	0,0067	0,0069	0,0065	0,0065	0,0065	V
	Coeficiente de variação		0,0027	0,0028	0,0027	0,0028	0,0026	0,0025	0,0025	V/V

Tabela 3 – Medição de 1A de corrente com os nove amperímetros, projetados das combinações das três placas com trilhas de corrente paralelas (1,2,3 voltas), com as diferentes blindagens (R1, U12, e sem blindagem).

Para avaliar a qualidade das medições realizadas, foram feitos nove histogramas a partir das 2472 amostras relativas aos níveis de tensão nas saídas de cada um dos nove amperímetros, quando estavam medindo uma corrente de 1A. É esperado que as amostras em cada histograma tenham uma distribuição normal, com média, mediana e moda com valores muito iguais ou muito próximos [13]. A equação 13 que descreve a função densidade de probabilidade da distribuição normal.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (13)$$

Os histogramas das seções 4.1, 4.2 e 4.3 confirmam a precisão e exatidão dos amperímetros com as medianas, medias e modas centradas próximo dos mesmos valores, e corroborando os desvios padrões (σ) da tabela 3 pela largura dos histogramas que acompanham a função de densidade de probabilidade com distribuição normal. A diferença no intervalo do eixo x (que representa os valores de tensão medidas nas saídas) entre o valor mais distante da média e a própria média, em cada histograma, é próximo a 3 vezes o valor do desvio padrão σ , como a figura abaixo.

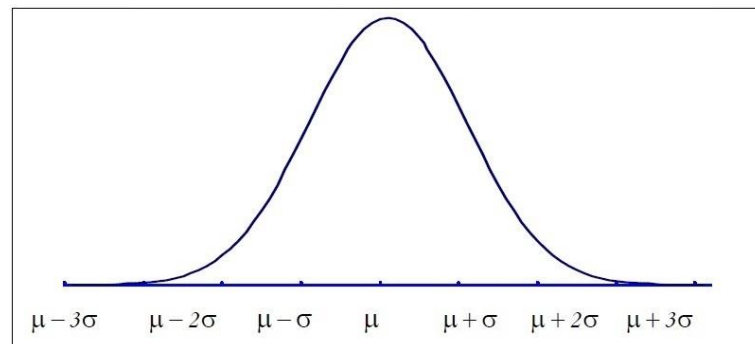


Figura 37 – distribuição normal, com a média centrada em μ e extremos em $\mu-3\sigma$ e $\mu+3\sigma$.

Nos histogramas a seguir nas seções 4.1, 4.2 e 4.3, a diferença entre os valores mais distantes e as médias serão sempre entre 18mV e 21mV, que quando divididos por 3, respectivamente, correspondem aos desvios padrões na tabela, entre 6mV e 7mV.

A relação sinal/ruído pode ser determinada pelo inverso do coeficiente de variação, descrito na equação 13. Mas pode ser descrita também em dB pela equação 14 abaixo:

$$\text{SNR} = \frac{\mu}{\sigma} \quad (14)$$

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{A_{\text{sinal}}}{A_{\text{ruído}}} \right)^2 \right] = 20 \log_{10} \left(\frac{A_{\text{sinal}}}{A_{\text{ruído}}} \right) \quad (15)$$

Onde A_{sinal} é equivalente à média μ e $A_{\text{ruído}}$ é equivalente ao desvio padrão σ . Pela tabela 3, o menor coeficiente de variação é 0.0022 e o maior é 0.0035. Deles é possível concluir que a relação sinal/ruído nas medidas realizadas com todos os amperímetros está dentro da faixa de 53.15dB e 49.12dB.

4.1 Amperímetros com placa 1 e blindagens variadas

As figuras abaixo 38, 39 e 40 mostram os histogramas da placa 1, ao se adquirir 2472 medidas em três amperímetros diferentes construídos pela combinação da placa 1 com blindagens R1 e U12 ou sem blindagem, e ao se aplicar uma corrente de 1A em cada um dos três. Além disso o gráfico da figura 41 abaixo mostra a comparação da sensibilidade dos três amperímetros, baseado nas médias da tabela 3, comparando-se as três retas que relacionam as tensões de saída em função da corrente.

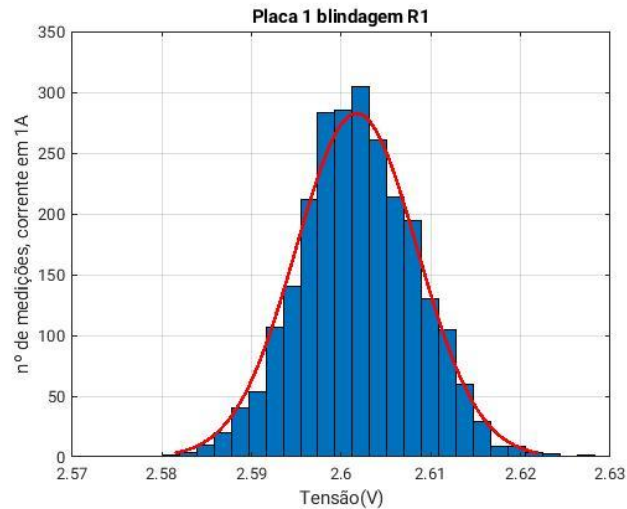


Figura 38 – Histograma da placa 1, com uma trilha de corrente e blindagem R1 de 48%NiFe, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

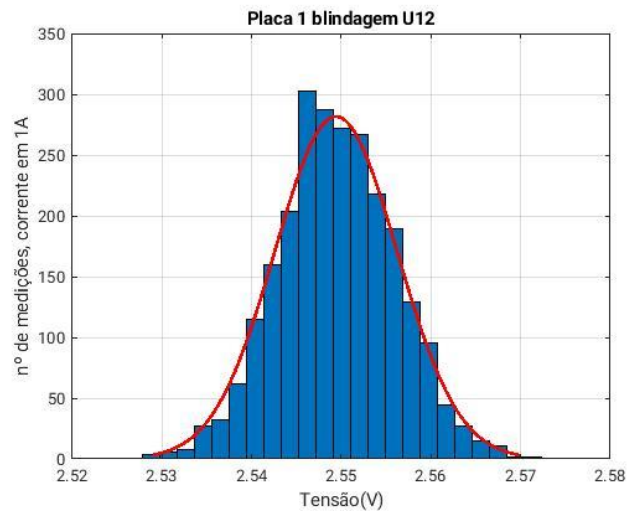


Figura 39 – Histograma da placa 1, com uma trilha de corrente e blindagem U12 de 48%NiFe, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

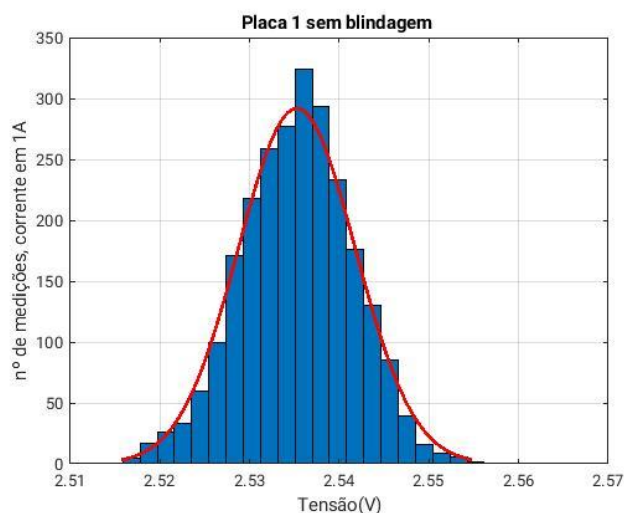


Figura 40 – Histograma da placa 1, com uma trilha de corrente e sem blindagem, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

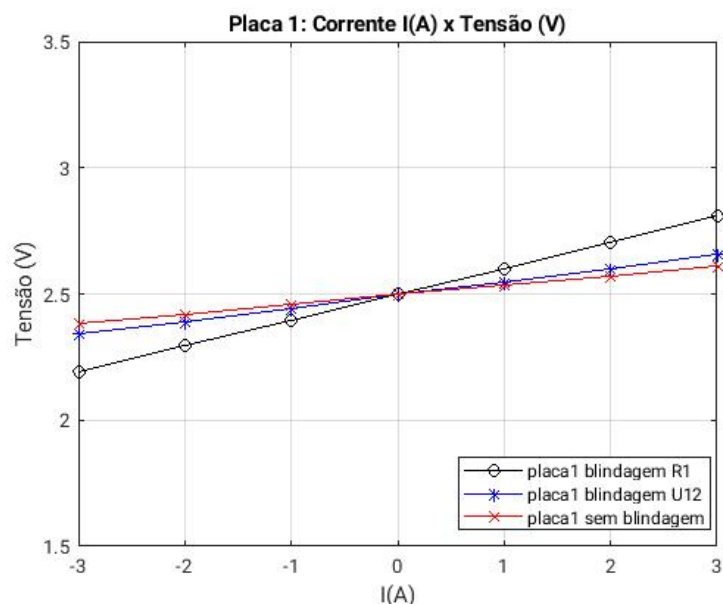


Figura 41 – Gráfico das tensões de saída em função da corrente dos três amperímetros construídos a partir da combinação entre a placa1 com as diferentes opções de blindagem.

As partir das equações das retas destes três amperímetros, é possível definir a sensibilidade em mV/A de cada combinação entre a placa 1 e as blindagens.

$$V1 = 0.0382I + 2.4976 \quad (16)$$

$$V2 = 0.0528I + 2.4973 \quad (17)$$

$$V3 = 0.1029I + 2.4985 \quad (18)$$

A equações 16, 17, e 18 definem as tensões de saída em função da corrente para a Placa 1 sem blindagem, placa 1 com blindagem U12 e placa 1 com blindagem R1, respectivamente. Os coeficientes destas equações correspondem à sensibilidade. Quanto maior o coeficiente melhor a sensibilidade e a resolução da medida. Logo a melhor resolução é dada pela combinação da placa 1 com a blindagem R1 com 102,9mV/A, seguida pela placa 1 com a blindagem U12 com 52,8mV/A, e por último a placa 1 sem blindagem com 38,2mV/A.

4.2 Amperímetros com placa 2 e blindagens variadas

As figuras abaixo 42, 43 e 44 mostram os histogramas da placa 2, ao se adquirir 2472 medidas em três amperímetros diferentes construídos pela combinação da placa 2 com blindagens R1 e U12 ou sem blindagem, e ao se aplicar uma corrente de 1A em cada um dos três. Além disso o gráfico da figura 45 abaixo mostra a comparação da sensibilidade dos três amperímetros, baseado nas médias da tabela 3, comparando-se as três retas que relacionam as tensões de saída em função da corrente.

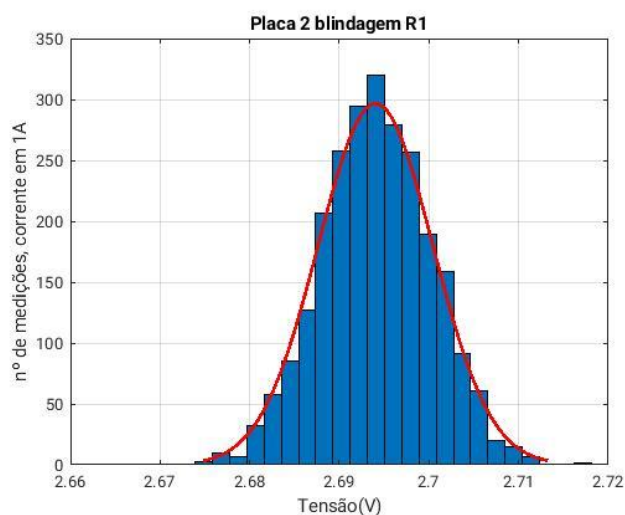


Figura 42 – Histograma da placa 2, com uma trilha de corrente e blindagem R1 de 48%NiFe, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

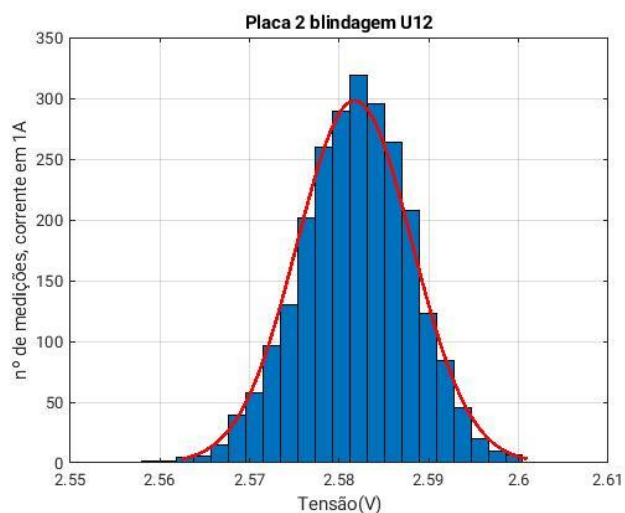


Figura 43 – Histograma da placa 2, com uma trilha de corrente e blindagem U12 de 48%NiFe, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

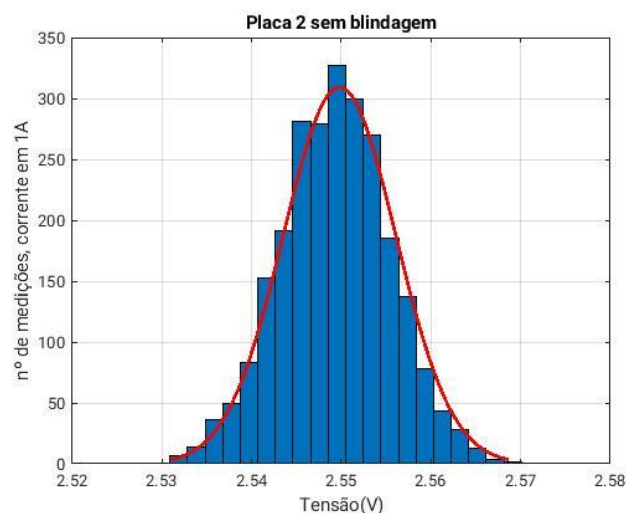


Figura 44 – Histograma da placa 2, com uma trilha de corrente e sem blindagem, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

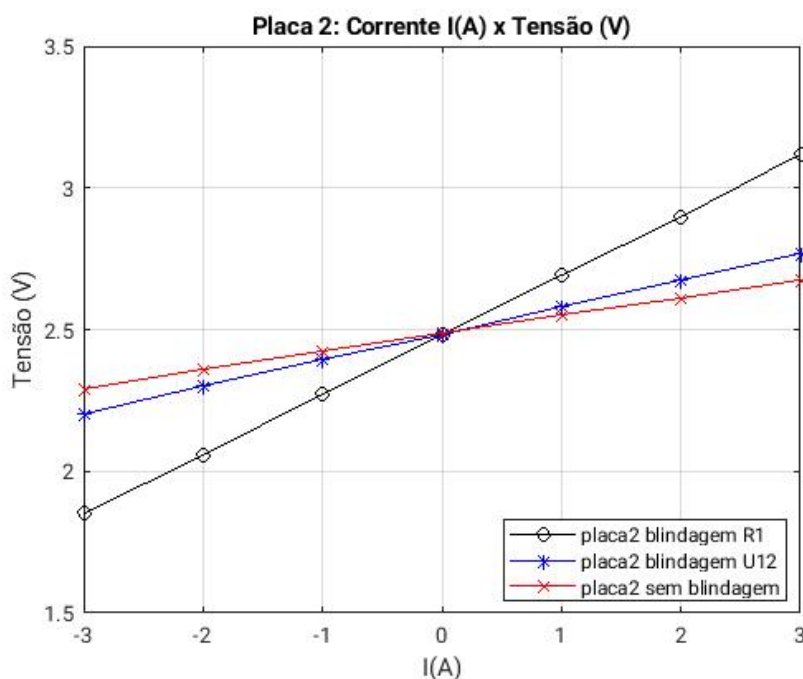


Figura 45 – Gráfico das tensões de saída em função da corrente dos três amperímetros construídos a partir da combinação entre a placa 2 com as diferentes opções de blindagem.

As partir das equações das retas destes três amperímetros, é possível definir a sensibilidade em mV/A de cada combinação entre a placa 2 e as blindagens.

$$V4 = 0.0640I + 2.4859 \quad (19)$$

$$V5 = 0.0944I + 2.487 \quad (20)$$

$$V6 = 0.2107I + 2.4827 \quad (21)$$

As equações 19, 20, e 21 definem as tensões de saída em função da corrente para a Placa 2 sem blindagem, placa 2 com blindagem U12 e placa 2 com blindagem R1, respectivamente. Os coeficientes destas equações correspondem à sensibilidade. A melhor resolução é dada pela combinação da placa 2 com a blindagem R1 com 210,7mV/A, seguida pela placa 2 com a blindagem U12 com 94,4mV/A, e por último a placa 2 sem blindagem com 64,0mV/A. Nota-se que os amperímetros construídos com a placa 2, devido ao enrolamento com duas voltas de trilha, tem aproximadamente o dobro de sensibilidade e resolução em comparação com os amperímetros construídos com a placa 1 e blindagens correspondentes.

4.3 Amperímetros com placa 3 e blindagens variadas

As figuras abaixo 46, 47 e 48 mostram os histogramas da placa 3, ao se adquirir 2472 medidas em três amperímetros diferentes construídos pela combinação da placa 3 com blindagens R1 e U12 ou sem blindagem, e ao se aplicar uma corrente de 1A em cada um dos três. Além disso o gráfico da figura 49 abaixo mostra a comparação da sensibilidade dos três amperímetros, baseado nas médias da tabela 3, comparando-se as três retas que relacionam as tensões de saída em função da corrente.

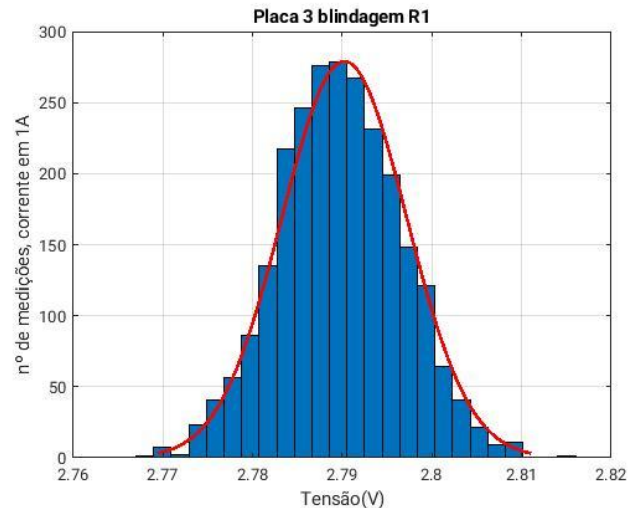


Figura 46 – Histograma da placa 3, com uma trilha de corrente e blindagem R1 de 48%NiFe, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

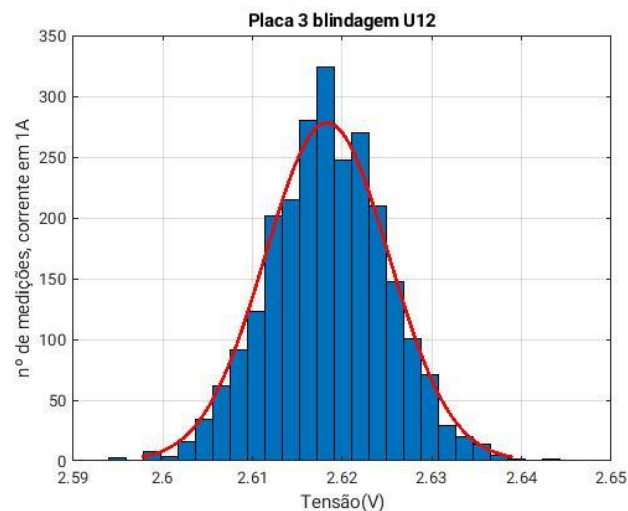


Figura 47 – Histograma da placa 3, com uma trilha de corrente e blindagem U12 de 48%NiFe, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

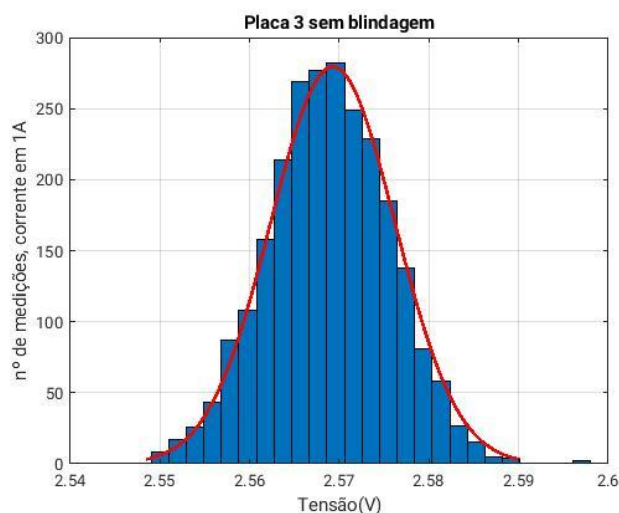


Figura 48 – Histograma da placa 3, com uma trilha de corrente e sem blindagem, ao se aplicar corrente de 1A. A linha em vermelho é a função de densidade de probabilidade da distribuição normal.

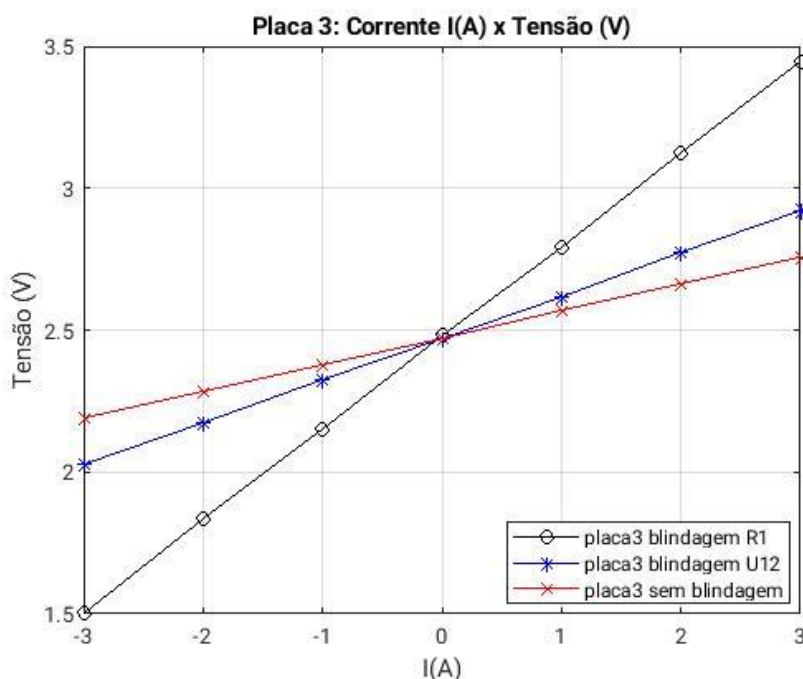


Figura 49 – Gráfico das tensões de saída em função da corrente dos três amperímetros construídos a partir da combinação entre a placa 3 com as diferentes opções de blindagem.

As partir das equações das retas destes três amperímetros, é possível definir a sensibilidade em mV/A de cada combinação entre a placa 3 e as blindagens.

$$V7 = 0.0947I + 2.4733 \quad (22)$$

$$V8 = 0.1486I + 2.4734 \quad (23)$$

$$V9 = 0.3230I + 2.4765 \quad (24)$$

As equações 22, 23, e 24 definem as tensões de saída em função da corrente para a Placa 3 sem blindagem, placa 3 com blindagem U12 e placa 3 com blindagem R1, respectivamente. Os coeficientes destas equações correspondem à sensibilidade. A melhor resolução é dada pela combinação da placa 3 com a blindagem R1 com 323,0mV/A, seguida pela placa 3 com a blindagem U12 com 148,6mV/A, e por último a placa 3 sem blindagem com 94,7mV/A. Nota-se que os amperímetros construídos com a placa 3, devido ao enrolamento com três voltas de trilha, tem aproximadamente o triplo de sensibilidade e resolução em comparação com os amperímetros construídos com a placa 1 e blindagens correspondentes.

4.4 Amperímetros sem blindagem e placas variadas

No gráfico da figura 50 são comparadas três retas baseadas nas médias da tabela 3, relacionando as tensões de saída em função da corrente. Essas retas mostram a sensibilidade de três amperímetros sem blindagem com as três placas diferentes, placa 1, placa 2 e placa 3, cada uma com um, dois ou três enrolamentos de trilha respectivamente.

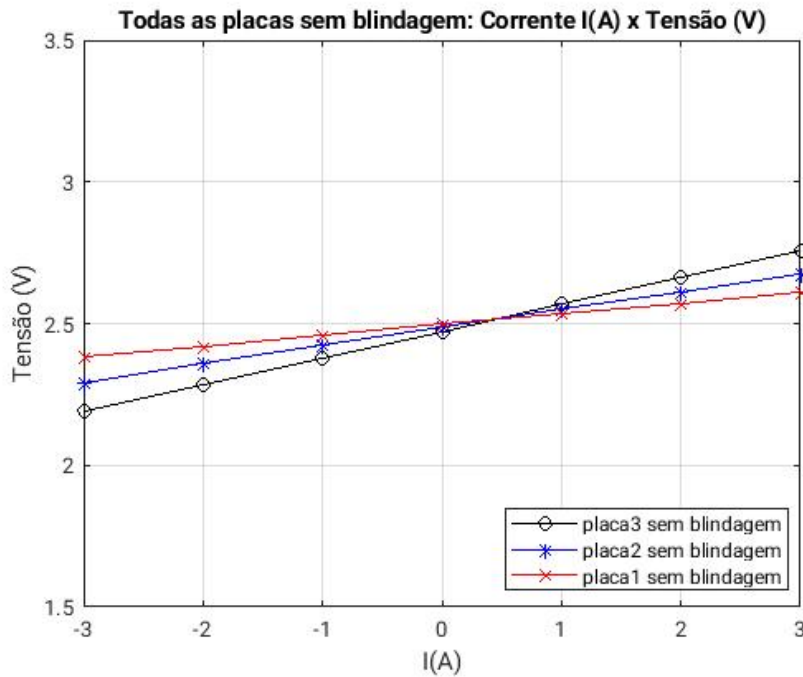


Figura 50 – Gráfico das tensões de saída em função da corrente dos três amperímetros construídos com as três placas projetadas sem blindagem.

$$V1 = 0.0382I + 2.4976 \quad (16)$$

$$V4 = 0.0640I + 2.4859 \quad (19)$$

$$V7 = 0.0947I + 2.4733 \quad (22)$$

As equações 16, 19, e 22 definem as tensões de saída em função da corrente para as três placas projetadas sem blindagens. Nota-se que o amperímetro construído com a placa 3, devido ao enrolamento com três voltas de trilha, tem sensibilidade de 94,7mV/A que é aproximadamente o triplo de sensibilidade quando comparado com o amperímetro construído com a placa 1 de 38,2mV/A; e tem aproximadamente 50% a mais de sensibilidade quando comparado com o amperímetro construído com a placa 2, de 64,0mV/A. Isso corresponde com o esperado, de acordo com a equação 9 que define a densidade de fluxo magnético em volta da trilha com enrolamento de N voltas.

4.5 Amperímetros com blindagem U12 e placas variadas

No gráfico da figura 51 são comparadas três retas baseadas nas médias da tabela 3, relacionando as tensões de saída em função da corrente. Essas retas mostram a sensibilidade de três amperímetros construídos pela combinação de blindagem U12, de material 48%NiFe, com as três placas diferentes, placa 1, placa 2 e placa 3, cada uma com um, dois ou três enrolamentos de trilha respectivamente.

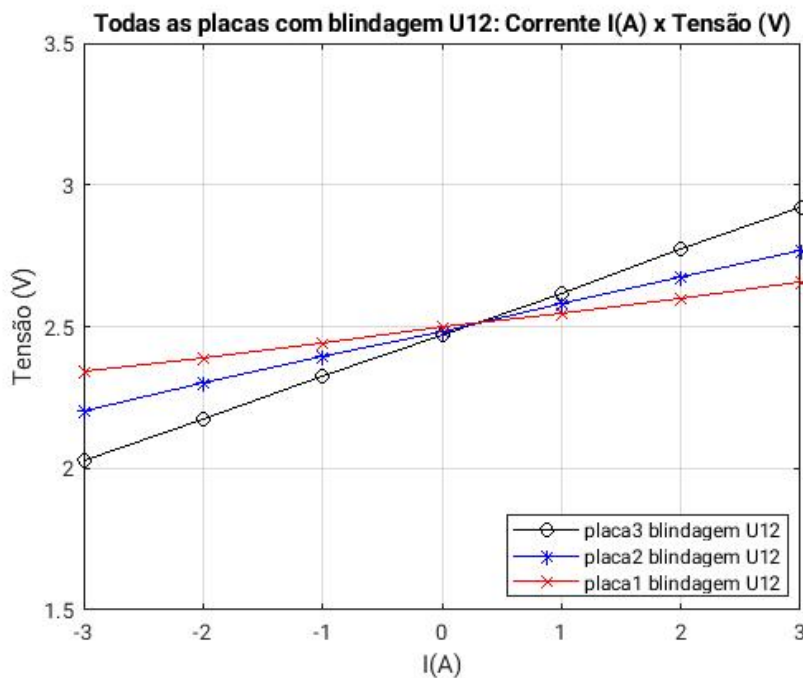


Figura 51 – Gráfico das tensões de saída em função da corrente, nos três amperímetros construídos a partir da combinação da blindagem U12 com as três placas projetadas.

$$V2 = 0.0528I + 2.4973 \quad (17)$$

$$V5 = 0.0944I + 2.487 \quad (20)$$

$$V8 = 0.1486I + 2.4734 \quad (23)$$

As equações 17, 20, e 23 definem as tensões de saída em função da corrente para as três placas projetadas com blindagem U12. Nota-se que a blindagem possibilita um aumento significativo na sensibilidade de todos os amperímetros se comparados com os mesmos sem blindagem.

Também é importante observar que o amperímetro construído com a placa 3, devido ao enrolamento com três voltas de trilha, tem sensibilidade de 148,6mV/A que é aproximadamente o triplo de sensibilidade em comparação com o amperímetro construído com a placa 1, de 52,8mV/A; e tem aproximadamente 50% a mais de sensibilidade em comparação com o amperímetro construído com a placa 2, de 64,0mV/A. Isso corresponde com o esperado, de acordo com a equação 9 que define a densidade de fluxo magnético em volta da trilha com enrolamento de N voltas.

4.6 Amperímetros com blindagem R1 e placas variadas

No gráfico da figura 52 são comparadas três retas baseadas nas médias da tabela 3, relacionando as tensões de saída em função da corrente. Essas retas mostram a sensibilidade de três amperímetros construídos pela combinação de blindagem R1, de material 48%NiFe, com as três placas diferentes, placa 1, placa 2 e placa 3, cada uma com um, dois ou três enrolamentos de trilha respectivamente.

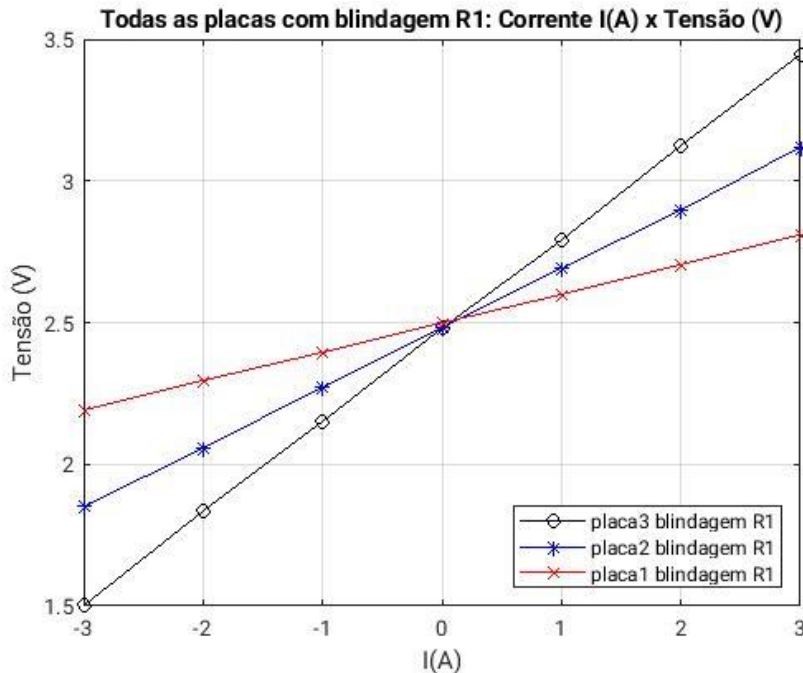


Figura 52 – Gráfico das tensões de saída em função da corrente, nos três amperímetros construídos a partir da combinação da blindagem R1 com as três placas projetadas.

$$V3 = 0.1029I + 2.4985 \quad (18)$$

$$V6 = 0.2107I + 2.4827 \quad (21)$$

$$V9 = 0.3230I + 2.4765 \quad (24)$$

A equações 18, 21, e 24 definem as tensões de saída em função da corrente para as três placas projetadas com blindagem R1. Nota-se que esta blindagem possibilita a maior sensibilidade de todos os amperímetros se comparados com os mesmos sem blindagem ou com a blindagem U12. Esse dado comprova também que a blindagem R1 é a melhor opção para melhorar a sensibilidade e resolução dos amperímetros.

Também é importante observar que o amperímetro construído com a placa 3, devido ao enrolamento com três voltas de trilha, tem sensibilidade de 323,0mV/A que é aproximadamente o triplo de sensibilidade em comparação com o amperímetro construído com a placa 1, de 102,9mV/A; e tem aproximadamente 50% a mais de sensibilidade em comparação com o amperímetro construído com a placa 2, de 210,7mV/A. Isso corresponde com o esperado, de acordo com a equação 9 que define a densidade de fluxo magnético em volta da trilha com enrolamento de N voltas.

5. Conclusão

A partir dos estudos do funcionamento do sensor IMC-Hall® MLX91205-AAL, foram projetados nove amperímetros baseados nas técnicas que melhoram a sensibilidade e a resolução dos instrumentos. Foram desenhadas três placas variando-se a arquitetura das placas adicionando-se enrolamentos extras e estreitando a trilha que deve conduzir a corrente elétrica objeto da medida. Também foram utilizadas blindagens com duas geometrias diferentes construídas com o mesmo material ferromagnético de 48%NiFe.

Os testes realizados com instrumentos de precisão, levantando-se a reposta de todos os nove amperímetros projetados revelou que todos os amperímetros têm excelente precisão e boa exatidão. As relações sinal/ruído encontrada em todos eles estão dentro da faixa de 53.15dB e 49.12dB. Em termos de ganho, essa relação sinal ruído varia entre 290 e 460, que é um excelente resultado para a precisão.

Em relação à exatidão, notou-se que com o aumento da sensibilidade, de uma placa para a outra, houve um leve deslocamento do erro devido ao incremento de uma tensão de offset. Isso fica evidente, observando os dados da tabela 3, na coluna que relaciona as médias dos níveis de tensão de saída quando a corrente é nula na trilha. O offset na placa 1 é -2mV, na placa 2 é -15mV, e na placa 3 é de -25mV. Esse erro de offset pode ser compensado utilizando-se um microcontrolador externo ou uma CPU que receba o sinal de saída do amperímetro faça a calibração a para compensar o offset.

Durante os testes, notou-se que os amperímetros projetados com as placas 2 e placas 3 tiveram aumento da temperatura ao aplicar-se corrente de 3A na trilha. Isso ocorreu devido à redução da largura da trilha, projetada para aumentar a sensibilidade do sensor. Esse aumento de temperatura inviabiliza a utilização de seis amperímetros projetados com essas placas para medir correntes acima de 5A, o que consequentemente inviabiliza também a aplicação destes amperímetros para o monitoramento da corrente de carga de 6A do carregador de baterias de lítio-íon de interesse.

Levando-se em consideração todos esses resultados, chegou-se à conclusão que o melhor amperímetro para a aplicação em questão é aquele projetado a partir da combinação da placa 1 com a blindagem R1 de 48%NiFe, e cuja equação de regressão linear é:

$$V_3 = 0.1029I + 2.4985 \quad (18)$$

Nesse amperímetro, a sensibilidade é de 102,9mV/A. A tensão de offset é 3mV e a relação sinal/ruído é 51.47dB. Todos esses dados confirmam a sensibilidade, a precisão e a exatidão necessárias para este amperímetro ser ideal para aplicação no carregador.

Por fim, todos os outros 8 amperímetros, mesmo não sendo os melhores para a aplicação no carregador, são de grande valia para aplicação em outros trabalhos. Os que tem menor resolução são ideais para monitoramento de correntes médias e correntes altas, podendo a placa ser acoplada ao cabo condutor desses sistemas de maior potência. Os de maior sensibilidade podem ser aplicados no monitoramento de correntes menores que 5 A, na instrumentação de equipamentos de laboratório, para monitorar correntes de dispositivos eletrônicos. Podem também ser utilizados para monitorar equipamentos eletrodomésticos, para controle de consumo doméstico.

6. Referências bibliográficas:

- [1] National Instruments™, "Current Measurements: How-To Guide", 08/2017.
- [2] 2009 Infineon Technologies AG®, "Current Sensing Using Linear Hall Sensors", pp. 5 e 6, Rev. 1.1, 02/2009.
- [3] SENAI - ES®, "Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção Metrologia Elétrica Básica", pp. 13, 1996.
- [4] Allegro™ MicroSystems, "Application Information: Hall-Effect IC Applications Guide", 27701-AN Rev.4 MCO-0000300, figure 3, pp. 2, 09/2018.
- [5] Melexis®, "Application Note Non intrusive current sensing with MLX91205", rev.001, 12/2008.
- [6] Melexis®, "Current Sensors Reference Design Guide", rev.002, 10/2016.
- [7] Melexis®, "MLX91205 IMC-Hall® Current Sensor (Triaxis® Technology)", rev. 012, 06/2013.
- [8] Melexis®, "Linearity & Hysteresis Application Note", rev. 012, 06/2013.
- [9] Wentworth, Stuart M. "Fundamentos do Eletromagnetismo com aplicações em engenharia", Editora LTC, edição 2006, capítulos 3 e 4, ISBN 8521615043, ISBN-13 9788521615040.
- [10] Honeywell®, "HALL EFFECT SENSING AND APPLICATION", capítulos 1 e 2.
- [11] Maglab®, "Shields for Current Sensing Applications Rectangular Shield Examples", rev.003, 01/2011
- [12] Maglab®, "U-Shield Ni-Fe Soft Ferromagnetic Shield", rev.008, 6/2016
- [13] Pinheiro, João Ismael D., "Probabilidade e Estatística – Quantificando a Incerteza", Editora Elsevier, edição 2012, capítulo 2, seção 2.4, ISBN 9788535237573, ISBN (versão eletrônica) 9788535259308